



Filipa Cristiana Reis de Oliveira

Licenciada em Ciências da Engenharia Química e
Bioquímica

Otimização dos Arrefecedores de Grelhas da Fábrica Maceira-Liz

Dissertação para obtenção do Grau de Mestre em
Engenharia Química e Bioquímica

Orientador: Eng. Nuno Marques, CMP - Secil

Co-orientador: Mário Eusébio, Professor, FCT – UNL,
Lisboa

Júri:

Presidente: Prof. Doutora Susana Barreiros, FCT - UNL

Arguente: Eng. Paulo Vidas, Maceira-Liz, SECIL

Vogal: Eng. Nunos Marques, Maceira-Liz, SECIL

Setembro 2015



FACULDADE DE
CIÊNCIAS E TECNOLOGIA
UNIVERSIDADE NOVA DE LISBOA

Otimização dos Arrefecedores de Grelhas da fábrica Maceira-Liz

Filipa Cristiana Reis de Oliveira

Dissertação para obtenção do Grau de Mestre em Engenharia Química e
Bioquímica

Orientador: Engenheiro Nuno Marques,
Maceira-Liz, SECIL

Co-orientador: Professor Doutor Mário
Fernando José Eusébio, FCT-UNL

Setembro 2015

Departamento de Fabricação da fábrica Maceira-Liz (Grupo SECIL)

Copyright © 2015

Filipa Cristiana Reis de Oliveira

Faculdade de Ciências e Tecnologia

Universidade Nova de Lisboa

A Faculdade de Ciências e Tecnologia e a Universidade Nova de Lisboa têm o direito, perpétuo e sem limites geográficos, de arquivar e publicar esta dissertação através de exemplares impressos reproduzidos em papel ou forma digital, ou por qualquer outro meio conhecido ou que venha a ser inventado, e de a divulgar através de repositórios científicos e de admitir a sua cópia e distribuição com objetivos educacionais ou de investigação, não comerciais, desde que seja dado crédito ao autor e editor.

Agradecimentos

A elaboração desta tese não teria sido possível sem a colaboração de várias pessoas a quem eu estou profundamente grata:

À empresa Maceira-Liz, em particular ao Departamento de Fabricação, por me terem aceitado e recebido tão bem para a elaboração deste trabalho.

Ao meu orientador da empresa, o Engenheiro Nuno Marques pela orientação e por me ter proposto este tema.

À Engenheira Ana Jerónimo, por todo o carinho, acompanhamento, paciência para responder às minhas questões e por ter partilhado comigo o seu gabinete.

Ao Engenheiro Paulo Vidas, pelo acompanhamento ao longo da elaboração deste trabalho e pela partilha de informação.

Ao meu orientador na faculdade, o Professor Mário Eusébio pela disponibilidade para o esclarecimento de dúvidas.

Também não poderia deixar de agradecer à equipa do laboratório da Qualidade, ao Senhor Carlos, ao Senhor Rui, ao Senhor Lino, ao Senhor Santos e ao Senhor Nuno, pelo apoio e pelos bons momentos proporcionados ao longo destes quase 8 meses.

Às várias equipas do departamento de fabricação que com muita paciência e sabedoria me tiraram todas as dúvidas sobre o processo de fabricação do cimento e me deixaram sempre ir ao SIMEQ retirar dados.

Um obrigado ao Amândio Menino que me aturou nos momentos mais difíceis e ouviu com atenção as minhas questões e pela também partilha de informação.

Aos meus amigos, em especial à Ana Henriques pela ajuda na construção de frases lógicas, ao Rogério Santos pela ajuda na elaboração deste trabalho, ao Nuno Silva e à Sara Dias pelas palavras de incentivo e a tantos outros que de uma maneira ou de outra me ajudaram a chegar aqui.

Aos meus amigos e colegas da faculdade pelos bons momentos passados ao longo destes 5 anos e pelo companheirismo.

Por fim quero agradecer de forma mais carinhosa e afetiva aos meus pais, pois sem eles nada disto era possível, pelos sacrifícios que fizeram, na educação prestada e pelas palavras de conforto nas horas de mais desespero.

Um Muito Obrigado a todos!

Resumo

A indústria de cimento tem realizado evoluções no seu processo produtivo, aumentando a sustentabilidade económica, ambiental e da gestão dos recursos naturais na produção do produto com a qualidade exigida pelo mercado. O grupo Secil não tem sido exceção nesta busca permanente pela melhoria contínua dos processos produtivos.

Este trabalho incide na otimização dos arrefecedores de 1ª geração presentes na fábrica Maceira-Liz do grupo Secil. O desempenho deste equipamento tem um forte impacto no consumo de combustíveis necessários ao processo, no consumo de energia elétrica e na qualidade do produto obtido. Um aumento na eficiência da troca de calor entre o clínquer e o ar de arrefecimento insuflado e na sua recuperação para o processo de combustão através do ar secundário permite obter um produto de qualidade similar mas com um fator de emissão de CO₂ mais baixo.

O desafio na gestão do funcionamento deste tipo de arrefecedor de clínquer é encontrar os objetivos certos para as variáveis de controlo do equipamento, para que este funcione com a menor oscilação possível na temperatura de saída do clínquer e na quantidade de calor recuperado para o sistema.

Para isso realizaram-se vários estudos às variáveis de controlo do arrefecedor a fim de encontrar a melhor combinação para um bom funcionamento do arrefecedor, aumentando a eficiência, bem como a quantidade, o calor e temperatura de ar secundário, diminuindo a temperatura de saída do clínquer e a quantidade ar em excesso.

Dos ensaios realizados durante o período deste trabalho, foi possível concluir que com a altura da camada de clínquer a 0,6m e a depressão no cabeçote a -6mmCA, o arrefecedor 7 (linha de produção 6) apresenta uma menor amplitude nas oscilações e a linha de produção tem-se mantido mais estável, ocorrendo menos paragens.

A recente instalação da medição de temperatura do clínquer na saída do arrefecedor vai permitir aos responsáveis de produção a execução de ensaios por forma a afinar controladores e a definir objetivos específicos para as variáveis de controlo (altura da camada de clínquer, depressão no cabeçote, quantidade total de ar de arrefecimento) que permitam um funcionamento eficiente e regular com o menor consumo de energia elétrica possível.

Abstract

The cement's industry has suffered a continuous evolution regarding the production process, increasing its economic, environmental and natural resources management sustainability during the production of produce maintaining with the quality standards required by the market. The Secil group has not been the exception to this permanent pursuit of a continual improvement in the production process.

The focus of this paper is the optimization of the first generation coolers at the Maceira-Liz factory, a member of the Secil group. The performance of this equipment has a significant impact on the fuel consumption essential to the process, the power usage and the quality of the produce. It has been shown that an enhancement in the efficiency of the thermal exchange between the clinker and the fresh cooling air along with an improvement in its recovery for the combustion process through the secondary air allows for a product with similar quality but a lower CO₂ emission factor.

The challenge in the management of this particular cooler's activity lies in finding the right objectives for the controlling variables, providing for the minimum oscillation possible of both the cold clinker temperature and the quantity of air recovered to the system during its employment.

Concerning this problem, the controlling variables have undergone several studies in order to ascertain the combination for optimum cooler function. On the one hand, allowing the enhancement of the cooler's efficiency along with an increase in the quantity, heat and temperature of the secondary air. On the other hand, permitting the diminishment of the cold clinker temperature and the excessive air quantity.

The tests carried out in the framework of this paper indicate that with the clinker layer at 0,6m and the depression hood at -6mmCA, the cooler 7 (production line 6) presents a lesser oscillation amplitude and a more stable production line, resulting in fewer stops.

The recent installation of the temperature measurement on the exit of the cooler will enable the production managers the implementation of trials with the purpose of refining the controllers and defining specific objectives for the controlling variables (height of the clinker layer, depression hood, total quantity of cooling air) which will allow for a more efficient and regular functioning, with the lesser power consumption possible.

Índice

AGRADECIMENTOS	III
RESUMO	V
ABSTRACT	VII
ÍNDICE	IX
ÍNDICE DE FIGURAS	XI
ÍNDICE DE TABELAS	XIII
SÍMBOLOS E ABREVIATURAS	XV
1. ENQUADRAMENTO E MOTIVAÇÃO	1
1.1 <i>Estrutura do relatório</i>	2
1.2 <i>Objetivos</i>	3
2. INTRODUÇÃO	5
2.1 <i>Secil</i>	5
2.2 <i>CMP-Maceira</i>	5
2.3 <i>Processo de Fabrico</i>	6
2.3.1 <i>Perfuração, britagem e pré-homogeneização</i>	6
2.3.2 <i>Moagem de cru e homogeneização</i>	7
2.3.3 <i>Cozedura e arrefecimento</i>	8
2.3.4 <i>Moagem do Cimento, Armazenamento e Expedição</i>	11
2.3.5 <i>Combustíveis e preparação</i>	12
2.4 <i>Constituição do clínquer</i>	13
2.5 <i>Arrefecimento do clínquer</i>	15
2.6 <i>O cimento</i>	19
2.6.1 <i>Cinética de Hidratação do Cimento</i>	20
2.6.2 <i>Tipos de Cimento</i>	21
3. ARREFECEDORES	23
3.1 <i>Tipos de Arrefecedores</i>	23
3.1.1 <i>Arrefecedor Rotativo</i>	23
3.1.2 <i>Arrefecedor de Satélites ou Planetário</i>	24
3.2 <i>Arrefecedor de Grelhas</i>	27
3.2.1 <i>1ª Geração ou Convencional – Placas Móveis</i>	27
3.2.2 <i>2ª Geração – Placas fixas</i>	29
3.2.3 <i>3ª Geração – Barras Transversais</i>	30
3.2.4 <i>4ª Geração – RevolvingDiscCooler</i>	32
3.3 <i>Definição: Arrefecedor de Grelhas</i>	34
3.3.1 <i>Ventiladores</i>	35
3.3.2 <i>Placas</i>	35
3.3.3 <i>Britador de Martelos</i>	36
3.3.4 <i>Conduitas</i>	36

3.3.5	Outros equipamentos associados ao arrefecedor	36
3.4	<i>Controlo e Manutenção dos Arrefecedores de Grelhas</i>	38
4.	MATERIAIS E MÉTODOS	49
4.1	<i>Balanço Energético – 1ªParte Experimental</i>	49
4.1.1	Condições de Medição	50
4.1.2	Eficiência.....	54
4.2	<i>Ensaio – 2ªParte Experimental</i>	55
5.	RESULTADOS E DISCUSSÃO	59
5.1	<i>Balanço Energético</i>	59
5.2	<i>Ensaio</i>	65
6.	CONCLUSÕES E PROPOSTAS FUTURAS	77
6.1	<i>Propostas futuras</i>	78
7.	BIBLIOGRAFIA	85
8.	ANEXOS	89

Índice de Figuras

Figura 2.1 Porção dos compostos que constituem o clínquer. Fonte: gobbo 2003	10
Figura 2.2 Sistema de piroprocesso. Fonte: Patfab, consultado a 7-2015.....	16
Figura 2.3 Movimento da chama do forno.....	17
Figura 2.4 A figura representa o clínquer quando sujeito a um arrefecimento rápido.....	18
Figura 2.5 Cinética de Hidratação do Cimento. [22].....	20
Figura 3.1 Arrefecedor rotativo desenhado por Vickers Armstrong e instalado em Kent&Shoreham [25].....	24
Figura 3.2 Arrefecedor de Satélites. Fonte: RHI	25
Figura 3.3 Representação das grelhas de um arrefecedor de 1ª geração	28
Figura 3.4 Representação das grelhas de um arrefecedor de 2ª geração	29
Figura 3.5 Regulador de Fluxo Mecânico. A azul encontra-se as possíveis entradas de ar.....	31
Figura 3.6 Regulação da entrada de ar tendo em conta a granulometria do clínquer no arrefecedor	31
Figura 3.7 Arrefecedor de 4ª geração. Fonte: CemPro Tec.....	33
Figura 3.8 Esquema das entradas e saídas de um arrefecedor de grelhas	34
Figura 3.9 Britador de martelos	36
Figura 3.10 Filtro de Mangas [38].....	38
Figura 3.11 Lista de estrutura - SAP.....	39
Figura 3.12 Sinótico da linha de produção 5 - SIMEQ.....	40
Figura 3.13 Controlo da depressão no cabeçote do forno.....	41
Figura 3.14 Quantidade de clínquer na grelha 1 tendo em conta a velocidade.....	44
Figura 3.15 Quantidade de clínquer na grelha 1 tendo em conta a velocidade.....	44
Figura 4.1 Esquema das entradas e saídas do arrefecedor	49
Figura 5.1 Altura da camada de clínquer e temperatura do ar secundário em função do tempo	63
Figura 5.2 Altura da camada de clínquer e a quantidade de ar secundário em função do tempo	63
Figura 5.3 Altura da camada de clínquer e a energia de ar secundário em função do tempo ...	64
Figura 5.4 Altura da camada de clínquer e a eficiência em função do tempo	64
Figura 6.1 “Altar” antes da manutenção.....	79
Figura 6.2 “Altar” depois da manutenção	79
Figura 6.3 Temperatura de saída do clínquer em função do tempo tendo em conta a granulometria do clínquer na grelha [47]	80
Figura 6.4 Influência da velocidade do forno para a segregação e distribuição do clínquer no arrefecedor [48].....	81
Figura 6.5 Localização do equipamento de transmissão de nível no arrefecedor	82
Figura 6.6 Design do equipamento de transmissão de nível	83

Índice de Tabelas

<i>Tabela 2.1 Reações de Clinquerização</i>	<i>9</i>
<i>Tabela 2.2 Principais módulos para o controlo da qualidade.....</i>	<i>11</i>
<i>Tabela 2.3 Caraterísticas físicas dos combustíveis.....</i>	<i>12</i>
<i>Tabela 2.4 Composição química do cimento</i>	<i>19</i>
<i>Tabela 3.1 Controlo da depressão no cabeçote no mínimo e máximo de funcionamento [43]..</i>	<i>42</i>
<i>Tabela 3.2 Velocidade das grelhas consoante a altura da camada e da produção.....</i>	<i>43</i>
<i>Tabela 3.3 Condições iniciais e atuais dos ventiladores do arrefecedor</i>	<i>45</i>
<i>Tabela 3.4 Controlo da velocidade da grelha 1 tendo em conta a pressão na câmara 2</i>	<i>46</i>
<i>Tabela 3.5 Pressão normal e máxima nas câmaras.....</i>	<i>47</i>
<i>Tabela 4.1 Cálculo da percentagem de ar falso.....</i>	<i>55</i>
<i>Tabela 4.2 Históricos do arrefecedor 8.....</i>	<i>57</i>
<i>Tabela 4.3 Históricos do arrefecedor 7.....</i>	<i>57</i>
<i>Tabela 4.4 Ensaios realizados no arrefecedor 7</i>	<i>58</i>
<i>Tabela 5.1 Dados dos caudais de ar do arrefecedor.....</i>	<i>59</i>
<i>Tabela 5.2 Quantidade de clínquer durante o balanço.....</i>	<i>59</i>
<i>Tabela 5.3 Dados da entrada e saída de clínquer.....</i>	<i>60</i>
<i>Tabela 5.4 Energia de Radiação e Convecção</i>	<i>60</i>
<i>Tabela 5.5 Balanço Energético.....</i>	<i>61</i>
<i>Tabela 5.6 Valores do balanço e valores teóricos.....</i>	<i>62</i>
<i>Tabela 5.7 Histórico 4 – Arrefecedor 8</i>	<i>65</i>
<i>Tabela 5.8 Histórico 5 – Arrefecedor 7</i>	<i>66</i>
<i>Tabela 5.9 Histórico 4: 90 ton/h e Histórico 2 – Arrefecedor 8.....</i>	<i>67</i>
<i>Tabela 5.10 Histórico 4: 90 ton/h e Histórico 1 – Arrefecedor 8.....</i>	<i>68</i>
<i>Tabela 5.11 Comparação entre o Histórico 5, Ensaio 1 e Ensaio 6 – Arrefecedor 7.....</i>	<i>69</i>
<i>Tabela 5.12 Comparação entre o Histórico 5, Ensaio 2 e Ensaio 3 – Arrefecedor 7.....</i>	<i>70</i>
<i>Tabela 5.13 Comparação entre o Histórico 5, Ensaio 3 e Ensaio 6 – Arrefecedor 7.....</i>	<i>71</i>
<i>Tabela 5.14 Comparação entre o Histórico 5, Ensaio 2, Ensaio 1 e Ensaio 5 – Arrefecedor 7..</i>	<i>72</i>
<i>Tabela 5.15 Comparação entre o Ensaio 2 e Ensaio 4 – Arrefecedor 7</i>	<i>73</i>
<i>Tabela 5.16 Comparação entre o Ensaio 1 e Ensaio 7 – Arrefecedor 7</i>	<i>74</i>
<i>Tabela 5.17 Composição do clínquer</i>	<i>75</i>

Símbolos e Abreviaturas

° – Graus
°C – Graus celsius
% – Percentagem
 Al_2O_3 – Óxido de Alumínio
ASIC – Agregado Siderúrgico Inerte para a Construção
Ca – Cálcio
CaO – Cal livre
 CaCO_3 – Carbonato de Cálcio
CDR's – Combustíveis Derivados de Resíduos
CDS – Sistema de Distribuição de Clínquer
CMP – Cimentos Maceira e Pataias
CO – Monóxido de Carbono
 CO_2 – Dióxido de Carbono
 C_2S – Belite ou Silicato dicálcico
 C_3A – Aluminato tricálcico
 C_3S – Alite ou Silicato tricálcico
 C_4AF – Ferro-Aluminato Tetracálcico
 Fe_2O_3 – Óxido de Ferro
g – Gramas
h – Horas
 H_2O – Água
kg – Quilogramas
 K_2SO_4 – Arcanite
KWh – QuiloWatt hora
mbar – Milésimos de Bar
MFR – Regulador de Fluxo Mecânico
MgO – Periclase ou Óxido de Magnésio
min – Minutos
MJ – Mega Joule
MPa – Mega Pascal
 m^3 – Metro Cúbico
mm – Milímetro
mmCA – Milímetro por coluna de água
 Na_2O – Óxido de Sódio
 NO_x – Óxidos de Azoto
PCI – Poder Calorífico Inferior
RDC – RevolvingDiscCooler (Arrefecedor de disco rotativo)
Si – Sílica
SIMEQ – SIMultaneousEquations
 SiO_2 – Dióxido de Silício
 SO_3 – Óxido Sulfúrico
ton – Toneladas

1. Enquadramento e Motivação

Foi a 21 de Outubro de 1824 que Joseph Aspdin patenteou o processo de produção do cimento que hoje conhecemos [1]. Este processo de produção passa pelo uso de um moinho de cru para redução da granulometria das matérias-primas a farinha. Posteriormente esta segue para o forno, onde a uma temperatura de aproximadamente 1450°C gera novos minerais, criando assim o clínquer. Este é arrefecido bruscamente e segue para o silo ou para expedição. Quando misturado com gesso ou outros aditivos forma o tão popular cimento cinzento ou cimento de Portland.

O cimento é um ligante hidráulico presente em praticamente todo o tipo de construção, desde barragens a edifícios. É dos produtos mais utilizados no Mundo e o mais consumido a seguir à água [2]. Quando misturado com areia, brita e água origina argamassas e/ou betões que edificam uma larga parte das estruturas do nosso dia-a-dia.

A nível mundial a indústria cimenteira tem vindo a aumentar a sua produção devido às exigências que todos os dias são impostas. Ainda assim, esta tendência não se verifica a todas as unidades cimenteiras, sendo o caso da CMP-Maceira. Com a crise económica sentida em todo o país, a empresa CMP-Secil, diminuiu a sua produção, tendo apostado, para fazer fase à diminuição das vendas nacionais, na exportação.

Embora o decréscimo na produção, a empresa continua a apostar fortemente na qualidade do produto e no desenvolvimento de novos métodos que sejam sustentáveis e que tenham em consideração as questões económicas, ambientais e sociais.

Na última década, têm-se vindo a aplicar métodos que focam principalmente nos seguintes aspetos:

- Diminuição do uso de recursos naturais de maior valor acrescentado, por substituição de matérias-primas secundárias obtidas a menor custo, mas sem alterar a qualidade do produto final: a valorização de resíduos provenientes de outras fábricas representa cerca de 5% do conjunto das matérias-primas necessárias para a produção de clínquer;
- Redução das emissões de CO₂: proveniente da calcinação dos carbonatos das matérias-primas e da combustão de combustíveis nos fornos de clínquer. A diminuição do CO₂ consiste em operar o processo de produção de clínquer para o mínimo de incorporação de clínquer exigido pela norma, ou seja, se incorporar menos clínquer no cimento, incorporo menos CO₂, logo há uma diminuição das emissões;
- Redução do consumo de energia elétrica: sendo a indústria cimenteira um dos maiores consumidores de energia há cada vez mais a noção da importância da sua redução. O estudo frequente dos equipamentos é um exemplo de como diminuir os gastos energéticos;
- Aumento do consumo de combustíveis alternativos: há alguns anos atrás, o processo de fabricação do cimento era movido com recurso aos combustíveis fósseis.

Atualmente essa realidade já não se aplica na sua totalidade e futuramente a tendência é deixar de usar estes combustíveis e apostar no uso de CDR's, tanto industriais como domésticos. No caso específico da Maceira, atualmente já apresenta taxas de substituição energética de cerca de 45-50% de CDR's e pneus, em termos globais [3].

- Diminuição do consumo de energia térmica: permitindo que o processo se torne mais estável.

Um dos métodos de controlo da eficiência da produção de cimento é realizada através de balanços mássicos e energéticos que nos dão a noção se o equipamento funciona dentro da gama exigida, tendo em conta os valores teóricos, de forma a poder haver um termo de comparação. Além do controlo realizado diariamente pelos equipamentos existentes nos laboratórios de processo, são realizadas análises nos laboratórios de química clássica e mecânica/física, de maneira a completar o controlo assim exigido. Com a introdução de novas tecnologias também é possível melhorar regularmente o processo da qualidade dos produtos através de sistemas operativos, tal como o SIMEQ e POLAB.

Desde que se instalou o sistema de controlo na fábrica de cimento CMP-Secil na Maceira é possível ter em tempo real como está a funcionar o equipamento, a que pressões e temperaturas, bem como a velocidade e quantidades de matérias-primas. Após se analisar o funcionamento dos arrefecedores de grelhas de 1ª geração instalados na fábrica, nas linhas 5 e 6 de produção houve a necessidade de os estudar. Estes apresentam uma anomalia no seu funcionamento, pois têm vindo a mostrar que ocorrem bastantes oscilações, tendo um período de bom funcionamento, depois um período onde a troca térmica entre os gases e o clínquer ocorre deficientemente, baixando drasticamente o seu rendimento.

1.1 Estrutura do relatório

O presente relatório apresenta 7 capítulos.

O capítulo II apresenta uma introdução sobre o grupo Secil, bem como, em particular da fábrica Maceira-Liz, onde se desenvolve o estudo. Descreve também o processo de fabrico do cimento desde a pedra até à sua expedição. Apresenta a descrição do clínquer e os tipos de cimentos produzidos.

O capítulo III é um capítulo teórico que retrata os diferentes tipos de arrefecedores. Expõe também uma descrição pormenorizada do arrefecedor de grelhas desde a sua manutenção e controlo aos seus aspetos mais gerais.

Os materiais e métodos correspondem ao capítulo IV que refere qual a metodologia usada para chegar à eficiência e apresenta os materiais e métodos usados para o desenvolvimento dos ensaios.

Segue-se o capítulo mais importante, o V. Este capítulo menciona as análises e os ensaios feitos, bem como a discussão do trabalho desenvolvido.

O capítulo VI apresenta algumas conclusões e pontos de trabalhos para continuação de um trabalho futuro no melhoramento dos arrefecedores presentes na fábrica.

Por fim o capítulo VII refere-se às referências bibliográficas.

1.2 Objetivos

Os objetivos deste trabalho irá consistir em:

- Realizar um balanço mássico e térmico ao arrefecedor do forno 6 para determinar o estado atual de operação do equipamento;
- Realizar um estudo das variáveis de controlo dos arrefecedores, de modo a entender como funciona o controlo e quais as variáveis que são possíveis controlar, tal como, o caudal total de ar de arrefecimento, a velocidade das grelhas, entre outros e aumentar assim a eficiência dos arrefecedores;
- Determinar quais os valores objetivos para as variáveis de controlo que permitem obter a melhor e mais estável eficiência de recuperação de calor;
- Determinar possíveis melhorias e análises a realizar em abordagens futuras nos arrefecedores da Maceira-Liz;

2. Introdução

2.1 Secil

Fundada em 1930 apresenta uma capacidade de produção instalada de cimento de 4 milhões de toneladas por ano, asseguradas pelas fábricas Secil-Outão, Maceira-Liz e Cibra-Pataias. Este conjunto no seu todo asseguram uma grande percentagem das necessidades em Portugal, sendo o restante exportado para todo o Mundo.

Embora a principal atividade seja a produção de cimento, a Secil engloba cerca de 40 empresas que operam em áreas complementares, tais como argamassas, betões ou equipamentos para a construção.

Em 1994 a Secil passou a ser a detentora das fábricas de cimento Maceira-Liz e Cibra-Pataias, devido à privatização das mesmas [4].

Atualmente Secil, Maceira-Liz e Cibra são três marcas de cimento que a empresa comercializa e cuja produção é feita sob apertado controlo de fabrico, de modo a manter altos padrões de qualidade que as certificações nacionais e internacionais exigem.

2.2 CMP-Maceira

A fábrica de cimento Maceira-Liz foi oficialmente inaugurada em 3 de Maio de 1923. Com o arranque da primeira linha de produção, esta teve uma grande adesão no mercado nacional, devido à enorme qualidade que caracterizava este cimento. Posto isto 5 anos depois arrancaram com a segunda linha de produção.

Entre 1968 e 1970, construíram e entraram em funcionamento mais duas linhas de produção, apresentando como características, o que na altura era um grande passo na inovação, fornos curtos com torres de pré-aquecimento e um comando centralizado em todo o processo fabril. Em 1986 essas linhas sofreram remodelações e desde então são responsáveis pela produção de mais de 1 350 000 ton/ano de cimento.

Sendo uma fábrica com várias inovações em Portugal salienta-se o processo de aproveitamento de pneus usados para a produção de aproximadamente 13% da energia térmica necessária para o pré-aquecimento de cada um dos fornos [4].

2.3 Processo de Fabrico

De forma a contextualizar e dar conhecimento do processo fabril do cimento cinzento produzido na fábrica Maceira-Liz, neste subcapítulo é explicado todo o processo. De modo a simplificar o texto, o processo pode ser dividido em 4 etapas:

- Perfuração, britagem e pré-homogeneização
- Moagem do cru e homogeneização
- Cozedura e arrefecimento
- Moagem de Cimento, Armazenamento e Expedição

No Anexo I é possível ver o diagrama do processo de fabrico do cimento.

2.3.1 Perfuração, britagem e pré-homogeneização

A obtenção da matéria-prima é realizada a partir da perfuração da pedra proveniente da natureza, recorrendo a explosivos ou com recurso a máquinas com martelos pneumáticos. Este último tem sido o mais utilizado, pois, as pedreiras já se encontram perto da população, sendo necessário reduzir as vibrações e reduzir a emissão de poeira para a atmosfera.

Após a extração, a matéria-prima apresenta-se em grandes blocos que podem ir ao máximo de 1m^3 , que são transportados, por *dumpers* até ao britador que irá reduzir a sua granulometria até inferior a 100mm, depois através de telas transportadores de borracha seguem para a pré-homogeneização.

A pré-homogeneização é uma etapa importante, pois permite reduzir o desvio padrão, ou seja, minimizar os efeitos das variações na composição química da matéria-prima, pois sendo esta retirada da natureza, apresenta sempre alguma variabilidade na sua composição. O material é empilhado em pilha, em pilha circular no caso da fábrica Cibra, e pilha longitudinal no caso da fábrica Secil. No caso da fábrica Secil-Maceira, a pré-homogeneização é feita retangularmente, existindo duas pilhas, a sul e a norte. O objetivo das duas pilhas é que enquanto uma está a ser consumida a outra está a ser repostada, garantindo que haja sempre disponível matéria-prima.

Através de um corte vertical, a máquina de retoma, retira simultaneamente material proveniente de diferentes períodos e zonas de extração, garantindo-se assim, uma menor variabilidade da matéria-prima.

Na mesma estrutura são armazenados os corretivos. Estes podem ser de origem natural ou proveniente de fábricas de indústria. A regulação deste corretivos é realizada através de um sistema informático de modo a que a sua dosagem seja corretamente efetuada.

2.3.2 Moagem de cru e homogeneização

A matéria-prima e os corretivos seguem pelas telas transportadoras até às tremonhas, que a partir de uma balança controlada por um sistema que doseia e controla as dosagens de cada um, que seguem para o britador secador de impacto de um eixo com martelos. Este britador seca, mistura e reduz a granulometria do material, facilitando assim o transporte e alimentação para o moinho de cru. Há que salientar que a secagem é feita, devido à entrada de ar quente (315°C) que vem do aproveitamento dos gases.

Após o britador, o material segue para o moinho de cru, novamente com auxílio a telas transportadoras. O moinho de cru é tubular horizontal de descarga central e é composto por 2 câmaras, com esferas de aço com diferentes tamanhos. A câmara 1 designada por moagem e a câmara 2 por afinação.

As matérias-primas e os corretivos entram na câmara 1, que devido ao movimento de rotação anti-horário e com auxílio a esferas de aço, reduzem a granulometria, para inferior a 0,2mm, de modo a obter uma farinha. Como o moinho apresenta uma descarga central, a farinha é transportada através de um ventilador de filtro de mangas, que permite que a farinha siga para os processos posteriores ou que retorne ao moinho. Esta separação é feita devido a um separador estático, onde os gases decantam os grossos e separam os finos, aqueles que apresentam a granulometria pretendida, e os grossos retornam à câmara 2. Normalmente cerca de 25% retorna a câmara 2, mas devido à alta eficiência da câmara 1, não tem sido necessário recorrer à câmara 2. Posto isto, os finos seguem através de um elevador para dois separados dinâmicos que são constituídos por pás que separam os finos dos grossos. Os finos seguem para os silos de homogeneização e os grossos retornam ao separador estático, que por sua vez seguem para o moinho.

A farinha é depositada nos silos de homogeneização para garantir que o desvio padrão seja baixo. Isto é possível, pois os silos estão equipados com um sistema que permite insuflar ar comprimido, de modo a garantir uma mistura o mais homogénea possível. É importante que a homogeneização seja feita corretamente, para garantir um clínquer de qualidade e a redução da utilização de combustíveis. A farinha sai do silo através de caleiras, seguindo para os elevadores que alimenta uma pequena tremonha, que serve de sistema de dosagem da farinha ao forno.

2.3.3 Cozedura e arrefecimento

Posto isto a farinha segue para os ciclones, que no seu todo formam a torre de ciclones ou torre de pré-aquecimento. Esta entra no ciclone 2 (contagem feita, de cima para baixo), seguindo-se para o ciclone 3 e posteriormente para o 4. Os ciclones 1 (são gémeos) servem para garantir que toda a farinha é separada do gás. Os ciclones têm a função de garantir que a farinha vá sofrendo alterações, de modo, a que à chegada ao forno, a farinha já esteja parcialmente descarbonatada. A farinha ganha temperatura, pois há troca de calor entre esta e o gás que passa em contracorrente. Na câmara de fumos são introduzidos pneus que contribuem assim para aumentar a temperatura dos gases.

É importante salientar que a evolução da temperatura deve ser tão rápida quanto possível e deve ocorrer em ambiente oxidante. A composição química e mineralógica do cru, o tempo de resistência e o perfil de temperatura no forno são determinantes para as características mineralógicas do clínquer produzido e consequentemente para o cimento que é produzido.

As reações ocorrem em fase sólida devido aos fenómenos de difusão iónica entre sólidos. Esta difusão é acelerada com o aparecimento da fase líquida nos interstícios dos grãos. A velocidade de difusão e a capacidade de clinquerização estão relacionadas com a quantidade de viscosidade dessa fase líquida.

As reações que ocorrem até à transformação da farinha em clínquer podem ser vistas na tabela 2.1, de forma sintetizada [5, 6].

Tabela 2.1 Reações de Clinquerização

Temperatura (°C)	Reação
100 – 200	Secagem. Eliminação da água livre $H_2O(l) \rightarrow H_2O(g)$ Ocorre no primeiro estágio de ciclones.
100 – 400	Eliminação da água combinada
400 – 750	Decomposição da argila em metacaulinite $Al_4(OH)_8Si_4O_{10} \rightarrow 2(Al_2O_3 \cdot SiO_2) + H_2O$
700 – 800	Início da descarbonatação: $CaCO_3 \rightarrow CaO + CO_2$
600 – 900	Decomposição da metacaulinite noutros compostos. Formação de uma mistura de óxidos reativos $Al_2O_3 \cdot 2SiO_2 \rightarrow Al_2O_3 + 2SiO_2$ Formação da ferrite cálcica
600 - 1000	Decomposição do calcário. Formação de CS e Ca $CaO + 2SiO_2 + Al_2O_3 \rightarrow 2(CaO \cdot SiO_2) + CaO \cdot Al_2O_3$
800 - 1200	Formação da belite, C_2S
900 - 1200	Formação dos aluminatos e ferríticos, C_3A e C_4AF
>1250	Início da fase líquida
1330 - 1450	Formação da alite, C_3S
1300 - 1240	Arrefecimento do clínquer Cristalização da fase líquida
<1200	Paragem das reações

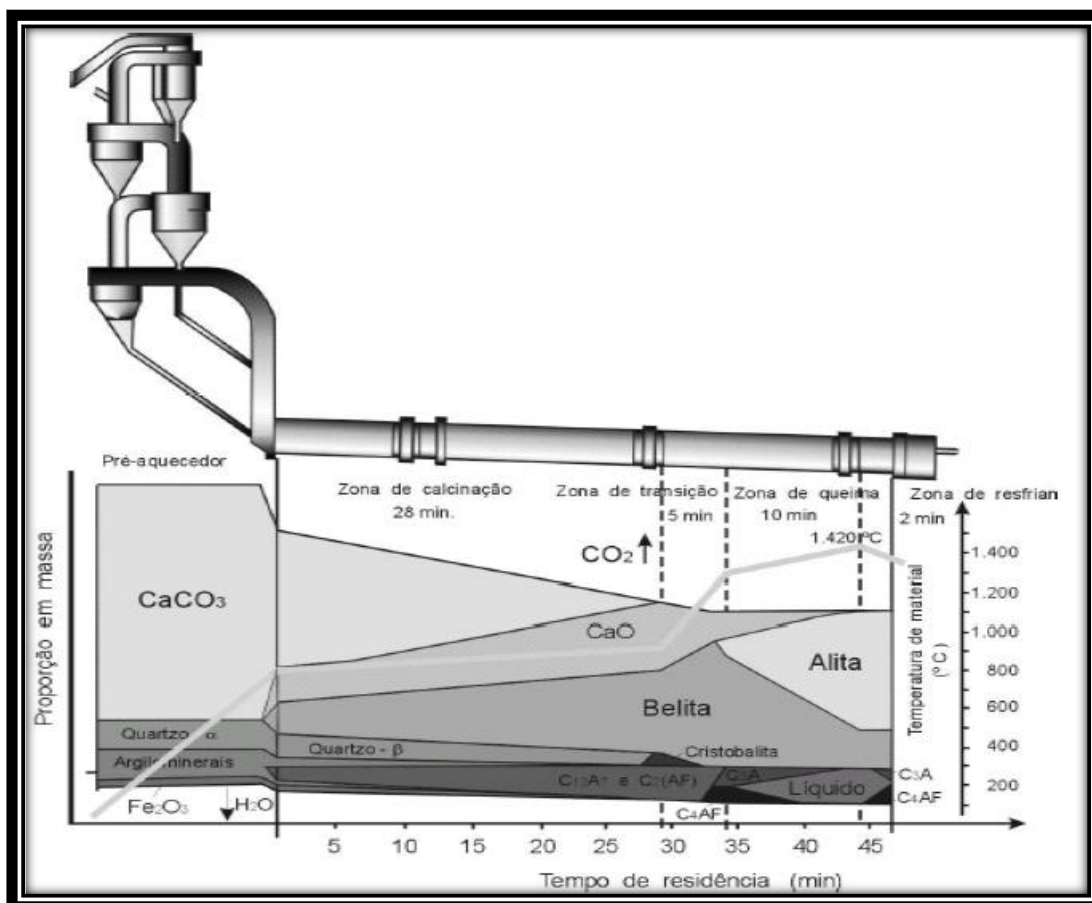


Figura 2.1 Porção dos compostos que constituem o clínquer. Fonte: gobbo 2003

No forno é onde ocorre a descarbonatação total da farinha e os processos de sinterização, passando-se então a designar por clínquer. O forno é cilíndrico rotativo com uma inclinação de 3°, de modo a garantir que o material seja escoado, é revestido com material refratário para haver a retenção de calor e proteger a estrutura de aço. Na parte mais baixa, contém a chama que é alimentada por coque de petróleo e/ou CDR's.

Para controlar a quantidade de cada constituinte do clínquer e levar a produzir um produto de melhor qualidade recorre-se a índice e módulos, estudados desde que se começou a produzir cimento, de modo a fornecer uma relação entre os componentes principais. No anexo II encontra-se mais informação sobre a função dos módulos e índices para um melhor entendimento [6].

Tabela 2.2 Principais módulos para o controlo da qualidade

Módulo Silicioso: <i>Exprime a relação entre os silicatos de cálcio e a fase líquida</i>	$MS = \frac{SiO_2}{Al_2O_3 + Fe_2O_3} = 1,9 \text{ a } 3,2$
Módulo Silicioso ácido: <i>Indica as condições ótimas para manter um bom nível de crosta na zona de cozedura</i>	$MSA = \frac{SiO_2}{Al_2O_3} = 2,5 \text{ a } 3,5$
Módulo Aluminoso: <i>Controla a viscosidade da fase líquida e a cinética de formação do C_3A</i>	$MA = \frac{Al_2O_3}{Fe_2O_3} = 1,5 \text{ a } 2,5$

A partir destes módulos criaram-se os fatores de saturação de cal partindo do pressuposto que a cal se combina sob a forma de C_3S e o ferro e o alumínio sob a forma de C_3A e C_4AF . E relacionou-se o MA com a fase líquida na zona de cozedura, de modo a perceber qual deverá ser a condução do forno.

O clínquer segue para o arrefecedor onde é arrefecido o mais rapidamente possível, de modo a não haver reações indesejadas, este passa por um britador de martelos, onde a sua granulometria é reduzida. Segue para o silo de armazenamento através de telas transportadoras. No capítulo a seguir o arrefecedor é descrito mais detalhadamente.

2.3.4 Moagem do Cimento, Armazenamento e Expedição

O clínquer é transportado por telas transportadoras até ao moinho tubular horizontal de bolas e juntamente com gesso são moídos em quantidades bem definidas, tendo em conta o que o plano de qualidade exige. Assim é possível obter vários tipos de cimentos.

Na moagem de cimento há vários parâmetros a controlar, nomeadamente a adição de gesso que se faz pela determinação do teor de SO_3 ou análise de fases, a adição de calcário pela determinação do teor de CO_2 , perda de fogo, carbonatos ou análise de fases, a adição de cinzas volantes ou pozolanas pela determinação do resíduo insolúvel ou análise de fases e por fim a adição de escória pela análises de fases. A finura é controlada através da determinação da superfície mássica de *Blaine*, resíduo de peneiração ou granulometria laser [6].

O moinho tem as mesmas características que o moinho de cru, a diferença é que a câmara 1 é menor que a câmara 2. O cimento é moído na câmara 1, segue para a câmara 2, este segue para um separador que vai separar os finos dos grossos. Os grossos retornam à câmara 1, fazendo o mesmo processo descrito acima e os finos, sendo o produto final, seguem para o silo de armazenamento.

Posteriormente, a saída de cimento da fábrica pode proceder-se de 2 maneiras: a granel ou em sacos.

2.3.5 Combustíveis e preparação

Para se garantir que o cru passa a clínquer é necessário o uso de grandes quantidades de combustíveis de modo a fornecer o calor necessário para que a temperatura dentro do forno atinja os 1450°C.

Tipicamente os combustíveis usados para a produção do cimento são combustíveis fósseis, tal como, o carvão, coque de petróleo e óleos pesados. Embora o óleo tenha vindo a perder popularidade ainda é usado para dar o arranque do forno quando este esteve parado, por exemplo para manutenção. Em relação ao carvão, este já não é uma alternativa usada na fábrica CMP-Maceira.

As propriedades físicas e químicas dos combustíveis têm grande influência no processo de combustão, na clínquerização e nas emissões atmosféricas. Na tabela seguinte é possível observar as características físicas críticas dos combustíveis [6, 7]:

Tabela 2.3 Características físicas dos combustíveis

Poder Calorífico	<ul style="list-style-type: none">- Parâmetro essencial na determinação da energia necessária para o processo- Flutuações vão provocar oscilações nas condições do forno
Humidade	<ul style="list-style-type: none">- Vai atrasar a ignição o que leva a dificuldades no controlo da queima- Vai consumir energia para a evaporação
Voláteis	<ul style="list-style-type: none">- Voláteis de materiais introduzidos na parte superior do forno ou com granulometria elevada, são volatilizados e saem pela chaminé sem serem queimados- Aumentam o volume de gases- Têm grande influência na formação da chama
Cinzas	<ul style="list-style-type: none">- Baixam o poder calorífico- Teores elevados podem atrasar a combustão- São incorporados no clínquer

As características químicas a ter em atenção para a seleção do combustível têm em conta a composição das cinzas que vão integrar o clínquer.

Este tipo de combustíveis sofrem um processo de coprocessamento. O coprocessamento consiste na destruição térmica pela queima de resíduos industriais ou de passivos ambientais, que assim têm um correto destino e contribuem para a economia de combustíveis da empresa. Assim ao queimar este tipo de combustíveis aproveita-se não só o seu poder calorífico para gerar uma boa queima, bem como a sua fração mineral [8].

Coque de Petróleo

O seu modo de preparação passa pelo processo de moagem, secagem e homogeneização. O processo de moagem do *pet-coke* é idêntico à moagem de cru, acima descrito. Na moagem do coque faz-se um controlo da finura e da humidade, que deverá de ser de cerca de 1%.

CDR's

Os combustíveis derivados de resíduos são combustíveis sólidos preparados a partir de resíduos não perigosos (resíduos industriais banais, de construção e demolição, de veículos em fim de vida, de sólidos urbanos entre outros) cuja sua utilização tem como objetivo a recuperação de calor [9].

Normalmente o seu PCI ronda os 18MJ/kg, apresenta um grande teor de humidade e de cloro, o que representa uma desvantagem, mas em contra partida apresenta menos teor em enxofre [10].

Pneus

Os pneus são introduzidos na câmara de transição ou de fumos que se encontra entre o fim do ciclone 4 e o início do forno. Estes saem do parque de pneus e seguem por uma tela transportadora até um sistema que alternadamente empurra o pneu inteiro para dentro da câmara.

2.4 Constituição do clínquer

Idealmente o clínquer deveria ter na sua constituição apenas os seguintes minerais, alite (C_3S), belite (C_2S), ferro-aluminato tetracálcico (C_4AF) e aluminato de tricálcico (C_3A), mas nem sempre tal acontece, sendo possível encontrar também cal livre (CaO), periclase (MgO) e arcanite (K_2SO_4).

O C_3S é o mineral mais importante e maioritário na constituição do clínquer, contribuindo para a resistência e endurecimento do cimento. Pode apresentar-se em sete formas diferentes, mas com comportamentos semelhantes entre si. À medida que a temperatura aumenta, este vai passando pelas diferentes formas polimórficas. É termodinamicamente instável abaixo dos $1250^{\circ}C$, mas pode ser mantida estável à temperatura ambiente se se fizer um arrefecimento brusco [6].

O C_2S reage mais lentamente que o C_3S , embora contribua também para a resistência do cimento, o que faz com que os resultados deste sejam visíveis apenas a longo prazo. O C_2S tem pelo menos cinco formas cristalinas com comportamentos muito distintos, mas apresenta-se principalmente na modificação β que se produz à temperatura de sinterização do clínquer. Também é possível obter a modificação α que é a mais reativa e a δ que é inerte [6].

O C_3A resulta da cristalização da fase líquida, que se forma quando a temperatura atinge os 1400-1450°C. É importante no comportamento reológico durante as primeiras horas de hidratação do cimento.

O C_3A reage muito rapidamente com a água, libertando muito calor, podendo levar ao fenómeno de falsa presa. Aumenta a resistência inicial do cimento quando combinado com silicatos e diminui a resistência do cimento quando este se encontra em meio agressivos. Apresenta quatro fases pseudo-polimórficas que surgem no clínquer consoante o teor em álcalis. Assim quando o teor de álcalis é elevado transforma-se na forma ortorrômbica e quando é baixo em cúbica [6].

É necessário adicionar gesso que serve para controlar a presa, pois vai reagir com o C_3A e com o C_4AF formando sulfo-aluminatos de cálcio e sulfo-ferritos de cálcio retardando assim a presa.

O C_4AF ocorre da dissolução sólida de uma série de cristais entre o C_2F e o C_6A_2F . É um cristal bastante estável e confere a cor cinzenta ao cimento, devido à presença de ferro. O C_4AF é bastante resistente a ataques químicos, principalmente de sulfatos, mas não contribui para o endurecimento hidráulico do cimento. Ao reagir com a água liberta aluminato tricálcico e ferrato monocálcico [6].

O CaO apresenta uma forma cúbica. Quando se mistura com a água reage rapidamente formando a portlandite ($Ca(OH)_2$), antes de se iniciar o endurecimento do cimento, logo não apresenta nenhuma consequência na expansibilidade.

O MgO quando misturado com a água reage lentamente formando brucite ($Mg(OH)_2$) que é a principal causadora da expansibilidade. Apresenta uma forma cúbica. Enquanto a K_2SO_4 resulta de uma fase líquida parcial distinta e é bastante solúvel em meio aquoso, podendo provocar o fenómeno de falsa presa.

2.5 Arrefecimento do clínquer

Um dos processos mais importantes na fabricação do cimento é o arrefecimento do clínquer, nesta etapa é muito importante que o clínquer seja arrefecido corretamente de modo a impedir que as reações que levaram à formação dos novos minerais constituintes do clínquer não sofram alterações. Os novos minerais formados durante a fase de clinquerização que ocorre no forno rotativo são essencialmente alite, belite. A fase líquida representa cerca de 30% do material que entra no forno, que sofre um arrefecimento para posterior cristalização dos seus minerais.

É possível dividir o arrefecimento do clínquer em duas partes. A primeira parte ocorre ainda dentro do forno, onde o clínquer após passar a zona máxima de temperatura é arrefecido até cerca de 1200°C, aí os silicatos cálcicos estão estáveis. Se se verificar que a alite apresenta bordas retilíneas e a belite bordas redondas [11], pode considerar-se que ocorreu um bom arrefecimento. Se tal não se verificar, e os silicatos cálcicos apresentarem formas irregulares, o arrefecimento sofreu alguma anomalia. A segunda parte ocorre já dentro do arrefecedor e onde se pretende que o clínquer seja arrefecido até cerca de 120°C.

Caso o arrefecimento seja demasiado lento, podem ocorrer as seguintes situações, tendo em conta a constituição do clínquer:

1. O C_3S decompõe-se em C_2S , pois a alite é instável a temperaturas inferiores a 1200°C e não conserva a sua estrutura – o que leva à diminuição da resistência do cimento e a um aumento da cal livre;
2. O óxido de magnésio cristaliza na forma de periclase, independentemente da fase líquida – há uma expansão do cimento após a hidratação;
3. O C_2S muda de rede cristalina, a belite apresenta as formas δ e β , a forma β é estável à temperatura de formação até 675°C. Abaixo desta temperatura a belite β transforma-se em δ que é inerte – há perdas de propriedades hidráulicas, nomeadamente na resistência do cimento [12];
4. Como o C_3A fica bem cristalizado este irá reagir mais rapidamente com a água originando uma presa mais rápida [13].

Um bom arrefecimento do clínquer requer uma estabilização dos silicatos de modo a evitar que o C_3S se transforme em C_2S , impedir a cristalização do magnésio para evitar a sua expansão, evitar que o C_2S adquira uma forma não hidráulica. Ou seja, evitar a formação de belite δ para não se perder as propriedades mecânicas do cimento e por fim e não menos importante a recuperação de energia na forma de calor [12].

O arrefecimento de clínquer poderá ocorrer em arrefecedores rotativos, nomeadamente, o arrefecedor de satélites ou em arrefecedores de grelhas. Na fábrica de Outão o arrefecedor é de satélites, e nas fábricas de Maceira e Pataias são de grelhas, embora com diferenças entre si [14].

O arrefecedor funciona com um fluxo de corrente cruzada entre o clínquer e o ar que entra a partir dos ventiladores que constituem o arrefecedor [15]. O clínquer é transportado por placas móveis ou fixas com auxílio a hastes, conforme a geração do arrefecedor até ao britador de martelos que reduz a granulometria do clínquer. Este é posteriormente transportado até ao silo de armazenagem por telas.

A entrada de ar dos ventiladores permite que seja possível haver uma troca térmica entre este e o clínquer que sai do forno. Essa troca térmica irá permitir que agora o ar aquecido siga para o forno como ar secundário.

Cerca de 30% do calor produzido no processo de transformação das matérias-primas em clínquer é recuperada no arrefecimento do clínquer, [16] isto favorece todo o processo em termos energéticos, pois há um aproveitamento do calor produzido.

Embora se tenha que ter em atenção às alterações que acontecem a nível mineralógico, é importante também ter em atenção à eficiência na troca térmica de calor. Caso esta seja deficiente, haverá um maior gasto de combustível e consequente, maiores gastos a nível económico, o que também não é o ideal.

A operação de um arrefecedor não pode ser estudada completamente isolada, este pertence a um conjunto de equipamentos que trabalham em sintonia (arrefecedor + forno rotativo + pré-calcinador), para a produção de um produto de qualidade, tal como demonstrado na figura 2.2.

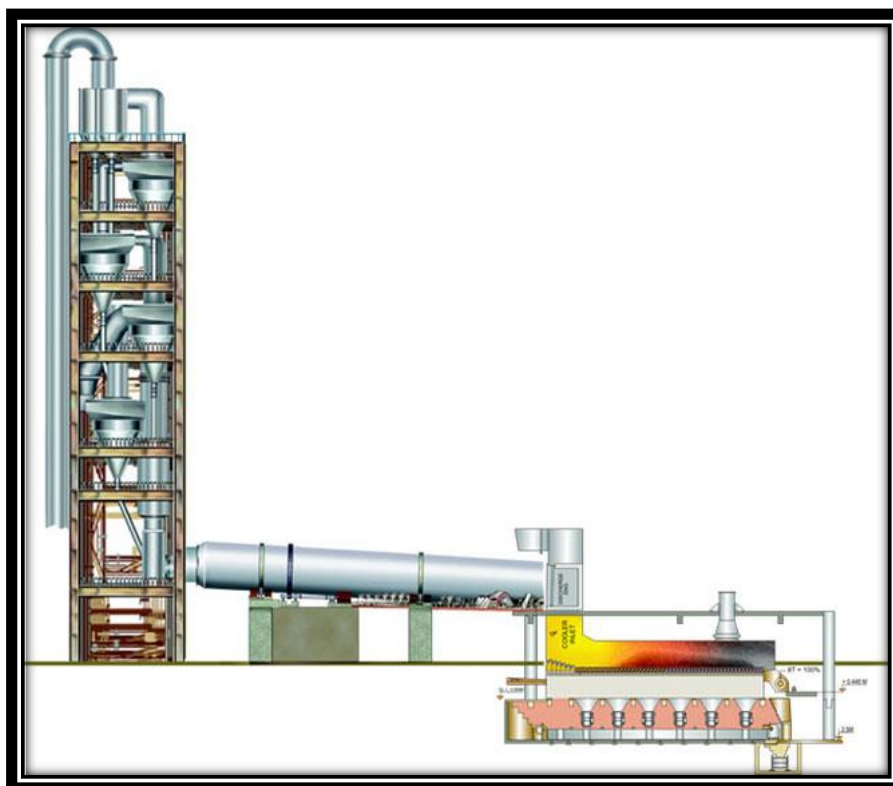


Figura 2.2 Sistema de piromineração. Fonte: Patfab, consultado a 7-2015

É importante ter uma noção do funcionamento de um forno rotativo, de modo a perceber que o que acontece no arrefecedor poderá influenciar todo o processo que se encontra anteriormente e vice-versa. O forno rotativo é influenciado pela qualidade da matéria-prima e pela transferência de calor no interior deste, ou seja, requer um regime de transferência de calor particular para a economia de combustível e uma produção máxima. Normalmente uma zona de queima quente e curta permite um aquecimento e arrefecimento rápido do clínquer, o que é o desejável [17].

É importante que no forno ocorra uma combustão completa, tal é possível se o combustível entrar em contacto rapidamente com o comburente, neste caso o oxigénio. Do ponto de vista energético, a quantidade de ar primário deveria ser a mais baixa possível para poder haver uma recuperação máxima do calor do ar secundário. Por outro lado, a energia cinética do ar primário deve ser suficientemente alta para promover uma boa mistura com o ar secundário e garantir que ocorra uma queima rápida [17].

A mistura entre o ar e o combustível é que define a forma da chama, por isso este processo deve ocorrer na região correta, de forma a não danificar o refratário nem a produzir quantidades excessivas de poluentes, como o NO_x e o CO. A mistura entre o ar e o combustível deve-se ao ar secundário que penetra no jato do ar primário e do combustível, criando uma região de turbulência, fazendo com que o combustível se espalhe e se vá misturando com o ar. Pela figura 2.3 é possível verificar a representação para uma chama ideal.

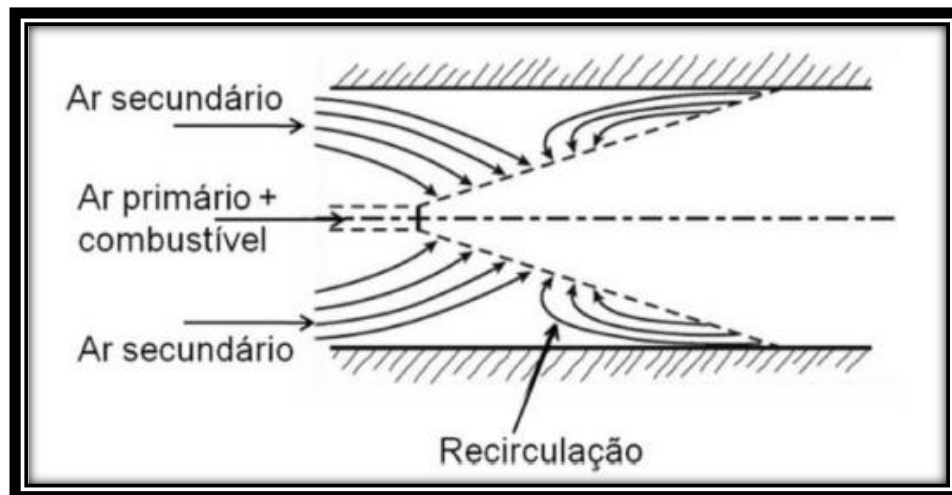


Figura 2.3 Movimento da chama do forno

O ar secundário percorre toda a extensão do forno até chegar à chaminé, sempre em contracorrente com a farinha/clínquer. Se o ar secundário não tiver uma temperatura elevada, superior 800°C, a troca térmica não foi efetuada corretamente. Então há a necessidade de queimar mais combustível para fazer face à temperatura de ar secundário baixa, o que leva também a um aumento de poluentes e a uma temperatura de clínquer à saída do arrefecedor maior. Por outro lado, uma boa temperatura de ar secundário minimiza a utilização de combustíveis e consequentemente uma temperatura mais baixa de clínquer à saída do arrefecedor [17].

É muito importante estabelecer um ponto de equilíbrio que nem seja introduzido ar secundário em excesso, pois isso irá diminuir a eficiência da combustão, nem que a introdução de ar secundário seja pobre. Isso conduziria a uma chama longa e instável e formação de poluentes, bem como, uma baixa eficiência em todo o sistema forno + pré-calcinador + arrefecedor.

Uma outra vertente a analisar é característica do clínquer formado. A sua granulometria e a sua porosidade têm influência na condução do forno, ou seja, se o clínquer apresentar alta porosidade indica que a queima foi insuficiente. Como tal houve zonas onde a reação de descarbonatação não foi completa, houve a produção de menos elementos que levam à formação da fase líquida e a moagem da matéria-prima foi insuficiente, logo há mais presença de cal livre. Por outro lado, um clínquer com baixa porosidade indica que a temperatura de clinquerização foi elevada, houve a formação em excesso de fase líquida e a moagem de cru foi elevada, levando à formação de cru muito fino [18].

Relativamente ao clínquer formado se o arrefecimento for lento o clínquer que se forma é mais poroso e a fase formada é cristalina, o que indica que a alite formada entra em desequilíbrio com a fase líquida. Como a fase líquida é ácida ataca os grânulos de alite e há a formação de cristais de belite em volta de toda a superfície dos cristais de alite, como representado na figura 2.4. Enquanto se o arrefecimento for rápido a fase formada é vítrea. Se houver um aumento de C_2S e uma redução de C_3S a porosidade aumenta e isso influencia a transferência de calor do clínquer [19].

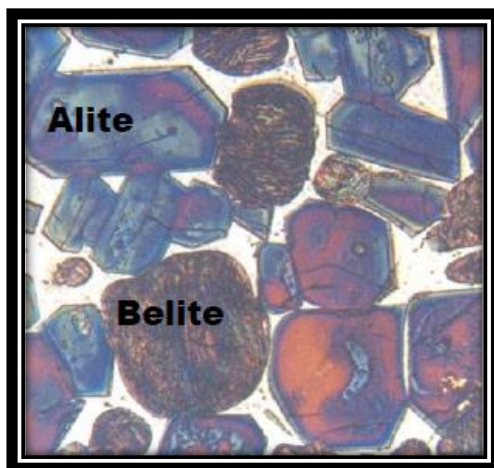


Figura 2.4 A figura representa o clínquer quando sujeito a um arrefecimento rápido

2.6 O cimento

O cimento é um ligante hidráulico, ou seja, é um material inorgânico que é finamente moído e posteriormente misturado com água que forma uma pasta que endurece devido a reações e processos de hidratação. Depois de endurecido este mantém a sua estabilidade e resistência mecânica mesmo debaixo de água [20].

O cimento cinzento é produzido a partir de duas principais matérias-primas: calcário e marga. O calcário é essencialmente formado por CaCO_3 e em pequenas quantidades por elementos argilosos e magnésio (composto indesejável), enquanto a marga é composta maioritariamente por sílica e contendo menor percentagem de CaCO_3 , alumínio e ferro.

Para além destas matérias-primas há a necessidade de recorrer a outros materiais, que possuem o nome de corretivos, estes corretivos compensam e/ou corrigem as falhas existentes das matérias-primas oriundas da natureza, para as exigências normativas do produto. Podem ser a areia - corretivo de sílica, calcário rico - corretivo de cal, granalha, pirite ou ASIC – corretivos de ferro.

Posteriormente estas são moídas e sujeitas a uma temperatura de cerca de 1450°C , onde se dá a grande parte das reações, que produzem o composto maioritário do cimento: o clínquer.

Para a produção de um cimento de qualidade é importante que a composição química deste tenha em conta a seguinte tabela [12]:

Tabela 2.4 Composição química do cimento

Nome composto	%
CaO	62 a 67
SiO₂	19 a 25
Al₂O₃	3 a 8
Fe₂O₃	2 a 5
MgO	0,5 a 2
H₂O + Na₂O	0 a 2
SO₃	1 a 3

2.6.1 Cinética de Hidratação do Cimento

A mistura do cimento com água forma uma pasta, esta irá endurecer em resultado das reações que ocorre entre os silicatos e os aluminatos com a água, dando origem a novos compostos estáveis que se ligam entre si conferindo assim a resistência do cimento.

O endurecimento hidráulico pode dividir-se em duas etapas: presa e endurecimento. Este mecanismo foi explicado pela primeira vez em 1887 por *LeChâtelier* na sua tese de doutoramento. *LeChâtelier* mencionou que “Quando se mistura cimento com a água obtém-se uma pasta que passa progressivamente ao estado sólido. Nesta passagem é necessário distinguir três fases:

1. Fenómeno químico da hidratação;
2. Fenómeno físico da cristalização;
3. Fenómeno físico-químico da passagem ao estado sólido por meio da criação de ligações entre os diferentes cristais que conferem coesão ao sólido” [21].

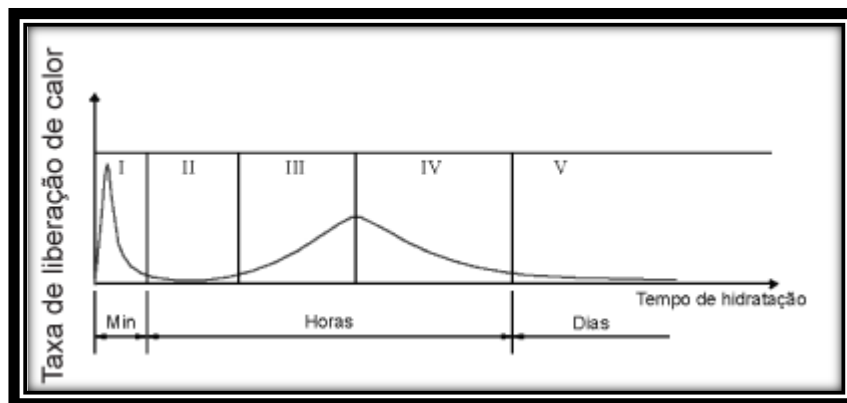


Figura 2.5 Cinética de Hidratação do Cimento. [22]

I – Hidratação inicial (0-15min): Nesta etapa não há a formação de produtos de hidratação evidentes. Ocorrem as hidrólises iniciais e há a libertação de iões de cálcio e silício.

II – Período de indução ou fase dormente (15min – 4h): Ocorre a dissolução de Ca e Si, mas de forma mais lenta. Existe a formação das primeiras partículas de gel e há um controlo por nucleação e por difusão.

III – Período de aceleração e presa (4 – 8h): Dá-se o crescimento de produtos de hidratação permanentes. Existe um controlo químico.

IV – Período de desaceleração e endurecimento (8 – 24h): Continua o crescimento dos produtos de hidratação, através dum controlo químico e por difusão.

V – Cura (1 – 28 dias): Densificação gradual da microestrutura. Formação da estrutura de gel CSH mais densas.

2.6.2 Tipos de Cimento

Os cimentos que podem ser produzidos são regidos pela norma NP EN 197-1 de 2001 [20]. O tipo de cimento é dado em função dos aditivos aplicados no fabrico, a classe representa a resistência aos 28 dias que é medida em MPa (32,5; 42,5 e 52,5), depois apresentam-se os sufixos, N: resistência às idades jovens normal, R: alta resistência às idades jovens e B: cimento branco.

Os tipos de cimento produzidos na fábrica Maceira-Liz são:

- Cimento tipo I 42,5R;
- Cimento tipo I 52,5R;
- Cimento tipo II 42,5R;
- Cimento tipo IV A 32,5R.

3. Arrefecedores

O objetivo deste capítulo é aprofundar o conhecimento sobre os vários tipos de arrefecedores de clínquer e o seu respetivo funcionamento. Um arrefecedor de clínquer incorpora uma parte importante no processo de produção de cimento e tem vindo a ser estudado para se melhorar a sua eficiência e tornar o seu gasto energético o mais baixo possível. Na sua função um arrefecedor tem dois objetivos que são fulcrais para um bom funcionamento: recuperar tanto calor possível a partir do clínquer, de modo a devolvê-lo ao processo através de ar secundário e/ou terciário e reduzir a temperatura do clínquer para um nível adequado ($<200^{\circ}\text{C}$) para a sua posterior armazenagem e/ou moagem para a produção de cimento.

Também serão estudados os arrefecedores de grelhas presentes na fábrica Maceira-Liz, a nível de funcionamento, manutenção e controlo.

3.1 Tipos de Arrefecedores

Existem dois grupos de arrefecedores: rotativos e de grelhas. Os rotativos foram os primeiros arrefecedores existentes, seguindo-se o arrefecedor de satélites, uma versão mais moderna dos arrefecedores rotativos e por fim os arrefecedores de grelhas.

3.1.1 Arrefecedor Rotativo

O primeiro arrefecedor a ser projetado e construído foi em 1890 e 1900 e até 1920. Este tipo de arrefecedor foi padrão em quase todas as instalações com forno rotativo e é o método mais simples [23]. Consiste num cilindro rotativo de aço revestido por tijolo e está localizado logo após o forno ou por falta de espaço, colocado por baixo do forno, como se pode na figura 3.1 [24]. O clínquer quente cai através de um tubo para o arrefecedor, este é arrefecido por ar atmosférico que entra em contracorrente.

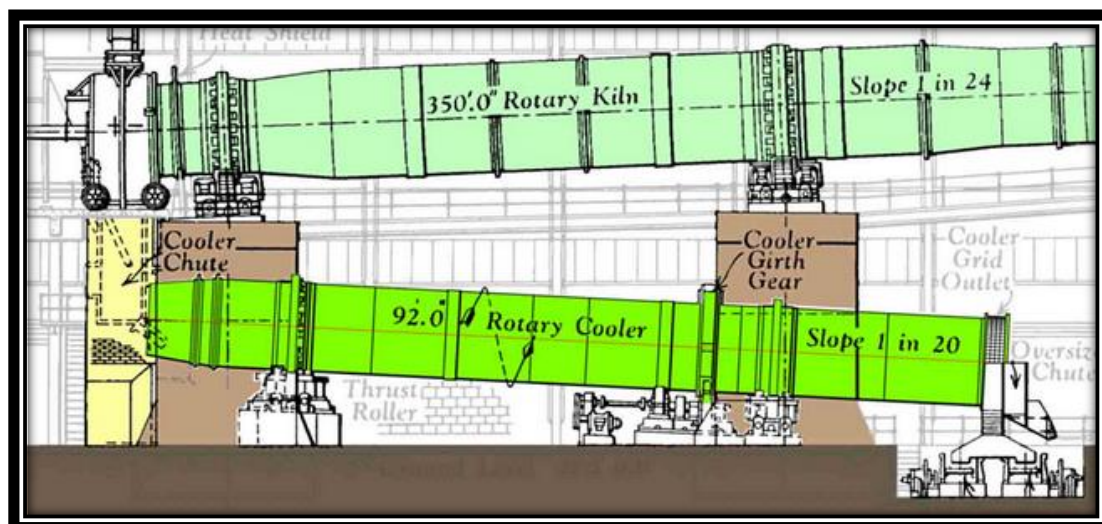


Figura 3.1 Arrefecedor rotativo desenhado por Vickers Armstrong e instalado em Kent&Shoreham [25]

O transporte do material realiza-se quando este é levantado até um determinado grau e cai para baixo no leito de material, com esta ação, a superfície de refrigeração é aumentada por uma quantidade significativa e a permuta de calor melhorada. Mas devido à grande produção de poeiras que seguem para o forno, causam uma perda de energia que leva a taxas de recuperação que não são ideais, devido a perdas de calor. Também não é possível controlar o progresso de arrefecimento, o que limita a sua influência sobre a qualidade do clínquer.

3.1.2 Arrefecedor de Satélites ou Planetário

Este tipo de arrefecedor vem dar continuidade ao arrefecedor rotativo, mas com algumas diferenças que permitiram melhorar a eficiência no arrefecimento do clínquer.

Utilizados desde 1920 [26], foram muito populares nos anos 1960 e 1970 para linhas de 4 estágios com pré-aquecedor e em 1986 os arrefecedores planetários equipavam aproximadamente 10% das novas instalações produtoras de cimento, tendo-se abandonado quase por completo os arrefecedores rotativos [23, 26]. Mas com a introdução de um pré-calcinador na linha de produção do cimento que requer uma conduta de ar terciário, este tipo de arrefecedor foi perdendo a popularidade, pois não é possível ser aplicado.

São constituídos por vários tubos, normalmente entre 9 a 11, instalados à volta da circunferência do forno. Os tubos arrefecedores acompanham o movimento de rotação do forno, por esta razão não precisam de motorização própria, além disso, este tipo de arrefecedor, necessita que o tubo do queimador esteja entre 1,5 a 2,5 metros para dentro do forno, para que assim o arrefecimento se inicie ainda dentro do forno e a descarga para os satélites estejam protegidas da chama. Esta zona é denominada de “arrefecimento interno no forno”. Esta zona é importante para garantir que o clínquer tenha um arrefecimento de 1400°C para 1200°C de modo a preservar a abertura de entrada dos tubos e garantir que a fase líquida

já esteja solidificada e assim evitar o ganho de crosta na descarga [26]. Este tipo de arrefecedor é dividido em três regiões: zona quente, intermédia e fria.

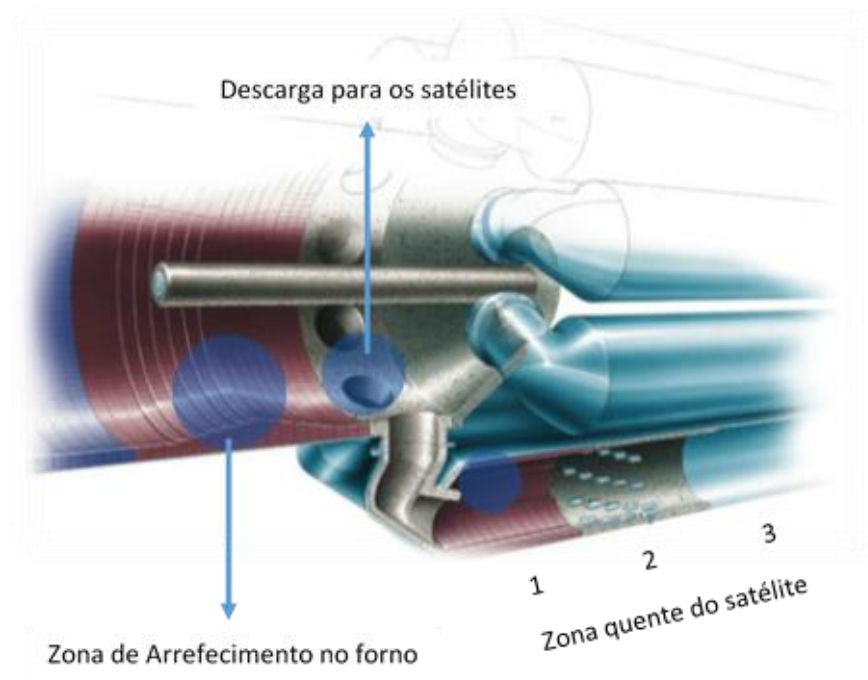


Figura 3.2 Arrefecedor de Satélites. Fonte: RHI

1. Zona quente: secção mais próxima do forno é revestida por refratário, devido à elevada temperatura que se encontra (1200°C). As temperaturas do clínquer e do ar variam de 850°C a 1100°C e 550°C a 780°C , respetivamente. Não há a presença de placas elevatórias mas sim de peças que quebram os torrões de clínquer. Estas peças são normalmente compostas por ligas metálicas com cerca de 30% de cromo [26].
2. Zona intermédia: a temperatura é um pouco mais baixa e as temperaturas do ar e do clínquer variam 150°C a 550°C e 350°C a 850°C respetivamente. O revestimento passa a ser metálico (aço resistente a altas temperaturas) e inserem-se placas elevatórias para se aumentar a troca térmica.
3. Zona fria: com temperaturas mais baixas, não há a necessidade de usar refratários e as placas elevatórias são de aço comum. A temperatura do clínquer varia de 180°C a 350°C e o ar entra à temperatura ambiente, podendo atingir 200°C nesta região.

As placas elevatórias têm como função melhorar a eficiência de transferência de calor, ou seja, vão expor o clínquer ao ar de arrefecimento. Como o clínquer ao longo do arrefecedor cai em forma de cascata, a zona de melhor eficiência é quando o clínquer cai das placas, havendo assim uma maior troca de calor entre este e o ar.

Existem alguns parâmetros que são necessários ter em conta quando se trata de melhorar a eficiência deste tipo de arrefecedor [26]:

- O clínquer tem que ser sujeito a troca de calor com o ar de arrefecimento. Para que isso seja possível é necessário a existência de placas elevatórias, como descrito acima;
- Quanto menor as partículas, maior é a área específica superficial, logo maior a permuta de calor, no entanto isto apenas se aplica para partículas com tamanho acima de 1,5mm. Se as partículas forem inferiores, estas são arrastadas pelo fluxo, o que origina um transporte induzido que deteriora o padrão de arrefecimento de permuta de calor;
- Cerca de 20% do calor perdido ocorre por radiação e convecção pela concha do arrefecedor. Embora seja uma forma do clínquer sair entre 140°C a 240°C, este fenómeno vai contra à melhoria da eficiência.

Nem sempre este tipo de arrefecedor funciona nas melhores condições, podendo haver sobreaquecimento do sistema. Quando a temperatura está muito elevada, ou se o sistema de arrefecimento já não estiver a trabalhar nas melhores condições, é importante ter em vista uma rápida resolução para o problema. Assim, se estas situações ocorrerem, a alternativa é fazer o arrefecimento recorrendo à evaporação da água de arrefecimento. Existem duas alternativas:

- Pulverização de água externamente: a parte de fora da zona mais fria do arrefecedor é pulverizada com água, havendo a recirculação desta. O consumo de água é na ordem dos 100g/kg de clínquer. É possível obter temperaturas de clínquer de aproximadamente 110°C;
- Injeção de água internamente: a injeção de água é realizada a partir de bicos de pulverização que são acionáveis quando o clínquer passa pela extremidade do arrefecedor. O consumo de água é de 30 a 50 g/kg de clínquer e está é pulverizada diretamente para dentro do tubo arrefecedor. A temperatura do clínquer é baixa entre os 50 a 100°C. Este método apresenta uma desvantagem, pois aumenta a quantidade de gases no forno.

A maior vantagem deste tipo de arrefecedor é a sua simplicidade: não há necessidade de se tratar o excesso de ar, não usa ventiladores nem motores, o que leva a um consumo energético de apenas 0,5 a 1 kWh por tonelada de clínquer. Por sua vez, a maior desvantagem deve-se ao custo elevado de manutenção devido ao desgaste rápido por ação do *stress* térmico, mecânico e abrasivo a que estão sujeitos. Além disso como não há ar em excesso, não é possível haver aproveitamento de ar, o que deixa aquém a opção por um arrefecedor de satélites [26, 27].

3.2 Arrefecedor de Grelhas

Entre os anos 1978 e 1983 com as exigências de aumento de produção e com a noção de aproveitar o calor proveniente do clínquer, o arrefecedor de grelhas foi desenvolvido. A sua operação consiste em fornecer ao equipamento ar à temperatura atmosférica provenientes de ventiladores instalados por baixo e/ou ao lado dos arrefecedores, este irá entrar em contacto com o clínquer que caí a partir do forno rotativo e irá proceder-se à troca de calor. Este tipo de arrefecedor pode dividir-se em duas zonas:

1. Zona de recuperação: devido às trocas de calor entre o clínquer quente e o ar, este é aquecido e é recuperado como ar secundário que é direccionado para o forno, e como ar de combustão usado, por exemplo, na moagem de carvão. Em arrefecedores mais recentes é possível a recuperação de ar terciário que é usado no pré-calcinador.
2. Zona pós-arrefecimento: arrefecimento do clínquer para temperaturas acima da temperatura ambiente e a sua britagem para granulometrias menores, com auxílio a um britador [23].

Devido à necessidade de evolução e de modo a melhorar a eficiência, os arrefecedores de grelhas foram evoluindo. Hoje é possível distinguir vários tipos de arrefecedores e distribuí-los por 4 gerações. Gerações essas, feitas tendo em conta as principais diferenças que apresentam entre si. A 1ª geração é caracterizada pela existência de placas fixas e móveis que alternadamente transportam o clínquer até ao britador. Enquanto a 2ª geração apresenta uma zona inicial de placas fixas e o clínquer flui através das placas devido à gravidade, apresentando também placas móveis. No entanto esta geração apresentava o uso de grandes quantidades de ar, então a *FLSmidth* criou a 3ª geração, com recurso ao uso de controladores de ar, tendo em conta o caudal necessário no arrefecedor. Por fim, ainda pouco implementada no mercado está a 4ª geração de arrefecedores, o arrefecedor de disco rotativo.

Há que salientar que os arrefecedores existentes na fábrica da Maceira são de 1ª geração e na fábrica de Pataias é de 3ª geração.

De modo a esclarecer as diferenças entre eles são posteriormente caracterizados os tipos de arrefecedores de grelhas.

3.2.1 1ª Geração ou Convencional – Placas Móveis

O primeiro arrefecedor de grelhas a aparecer no mercado foi desenvolvido pela empresa *Fuller* (agora *FLSmidth*) em 1930. O seu *design* é simples e devido à inclinação do forno, o clínquer é escoado, caindo para cima das placas móveis.

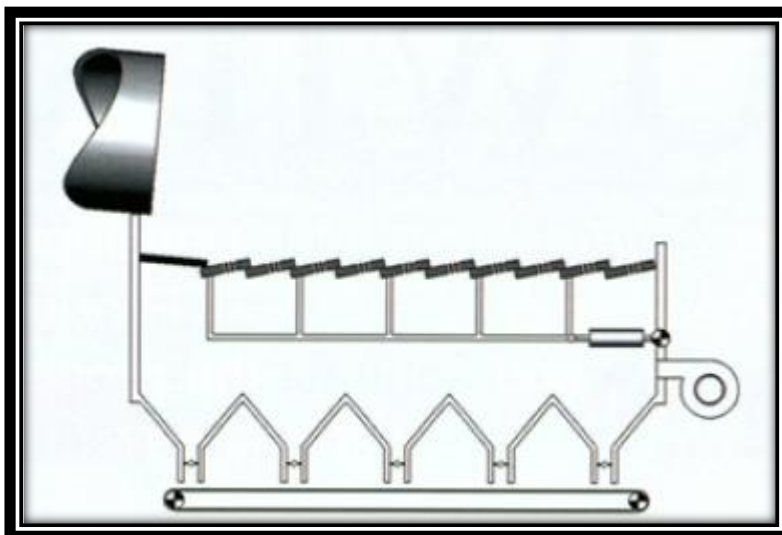


Figura 3.3 Representação das grelhas de um arrefecedor de 1ª geração

As grelhas são constituídas por uma liga metálica, possuindo orifícios que permitem a passagem de ar e posterior arrefecimento do clínquer. O clínquer é empurrado pela parte vertical do bordo frontal da placa anterior que cai para a placa seguinte e assim sucessivamente até chegar ao britador.

O ar de arrefecimento penetra pelo leito do clínquer, ou seja, perpendicularmente e absorve a calor deste. Este ar pode ser aproveitado para o britador da moagem de carvão ou outros afins. O ar é fornecido através de ventiladores e é importante que tenham a pressão suficiente para conseguir penetrar o clínquer, arrefecê-lo e compensar a expansão do ar devido ao aquecimento [14].

O que caracteriza os arrefecedores de 1ª geração é a simplicidade. As suas principais características são [14]:

- Placas de grelha com orifícios redondos;
- Duas ou três grelhas, dependendo do tamanho;
- Inclinação da grelha de 0° a 3° ou ambas;
- Acionamento mecânico excêntrico para grelhas vaivém;
- Câmara de arejamento;
- Pressão do ventilador de 45mbar a 25mbar;
- Compartimento mais pequeno na entrada, maior na direção de saída;
- Trajeto do sistema de extração de finos com aberturas, vedações e cadeias de arrasto;
- Britador de martelos na descarga do arrefecedor.

3.2.2 2ª Geração – Placas fixas

Com o grande desgaste das placas móveis, devido essencialmente ao calor do clínquer, o arrefecedor convencional requeria grandes paragens para manutenção o que tornava o processo dispendioso. Por isso desenvolveu-se um arrefecedor que na sua constituição apresentava placas fixas que devido a uma inclinação de 12 a 17° e placas móveis que faziam com que o clínquer fosse escoado até ao britador.

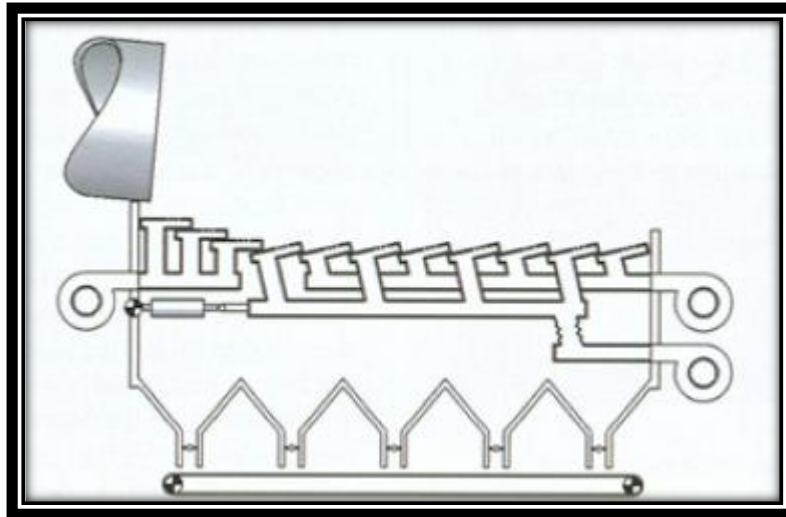


Figura 3.4 Representação das grelhas de um arrefecedor de 2ª geração

Outra diferença foi a implementação de feixes de ar (*airbeam*) que são direccionados para diferentes placas ao longo do arrefecedor através de tubos. A eficiência térmica aumentou, assim como a distribuição do ar e o seu respetivo controlo.

O problema da 1ª geração residia na primeira parte das placas do arrefecedor, era necessário um fluxo muito elevado de ar para garantir um correto arrefecimento da placa, de modo a evitar o seu desgaste. Assim para eliminar esse problema, as placas na primeira parte do arrefecedor são fixas, eliminando-se assim o problema do desgaste. O transporte do clínquer nessas placas deve-se à força da gravidade e à inclinação a que essas placas estão sujeitas. As restantes placas são móveis fazendo com que o clínquer seja escoado, de igual modo como um arrefecedor de primeira geração [28].

3.2.3 3ª Geração – Barras Transversais

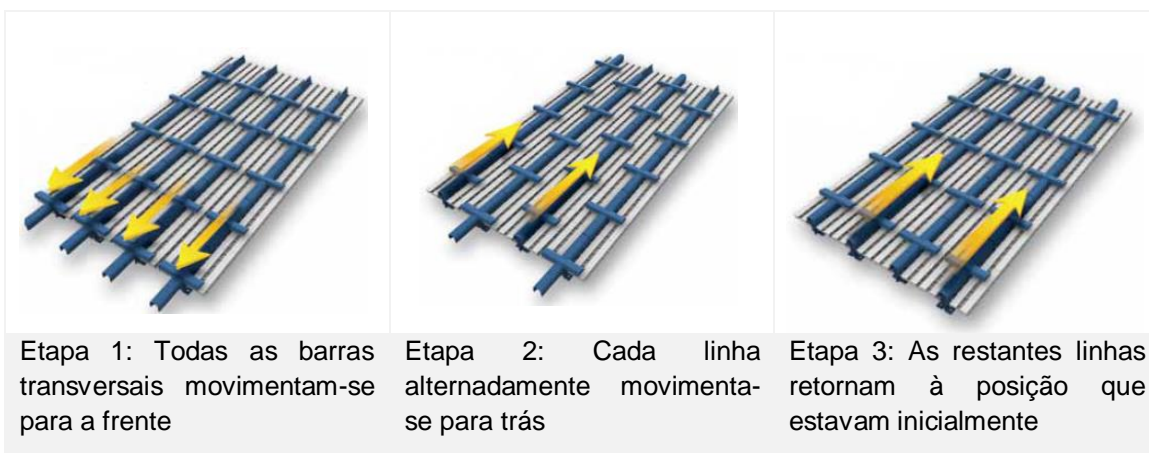
No final dos anos de 1990, a *FLSmidth* introduziu no mercado um arrefecedor que na sua constituição continha um certo número de barras transversais, conforme a produção de clínquer a ser produzida e a base era constituída por uma grelha completamente estática. A barra transversal funciona como uma barra de impulso que opera acima da grelha de modo a transportar o clínquer através do arrefecedor [29,30].

Com a crescente introdução de vários tipos de arrefecedores provenientes de várias empresas, o mercado tornou-se muito competitivo, e a *FLSmidth* de modo a continuar pioneira na venda e fabrico de arrefecedores, ao lançar o *cross-bar* introduziu também o conceito de regulador do fluxo mecânico que controla o fluxo de ar por meio de um orifício autoajustável.

O arrefecedor apresenta uma entrada fixa para a entrada do clínquer munida de um sistema *Air – BlastControlled* (ABC ou Injeção Controlada de Ar de Limpeza) que impede a formação de *swonman* e oferece um bom início para o processo de arrefecimento, obtendo uma camada de clínquer mais uniforme.

O arrefecedor é construído horizontalmente, por uma linha de grelhas estacionárias e que são preenchidas por uma camada de clínquer estático que protege as placas de distribuição de ar contra o calor, prevenindo assim o seu desgaste. Por cima da linha estacionária são colocadas as barras transversais que transportam, cortam e misturam o clínquer de forma que a exposição ao ar de arrefecimento seja o mais eficaz possível. Ao redor das placas de acionamento existem perfis de vedação em “U” e “C” que funcionam como guarda-pó, ou seja, impedem que o clínquer se entranhe no compartimento sob a grelha, prevenindo que mesmo com o seu movimento alternado, as extremidades nunca serão expostas a desgaste pelo clínquer [29].

O funcionamento das barras transversais é o seguinte [29]:



Cada linha móvel é operada por dois ou quatro cilindros hidráulicos, dependendo do tamanho do arrefecedor, e trabalham entre si independentemente. Embora todas as barras transversais tenham um movimento vai-e-vem, o movimento de cada linha pode ser ajustado em separado suprimindo as necessidades da variação da camada de clínquer.

Cada placa está equipada com um Regulador de Fluxo Mecânico (MFR), ver figura 3.5 em que o objetivo é obter um controlo contínuo do fluxo de ar ajudando a otimizar a recuperação de calor e a distribuição de ar em todo o arrefecedor. O MFR mantém o fluxo de ar constante dentro do arrefecedor independentemente da altura da camada de clínquer, da distribuição granulométrica das partículas ou da temperatura. Assim quando há uma perturbação no sistema, este mecanismo irá compensar esse défice ou excesso de ar automaticamente e manter o fluxo constante, sem a necessidade de recorrer a um operador, ver figura 3.6.

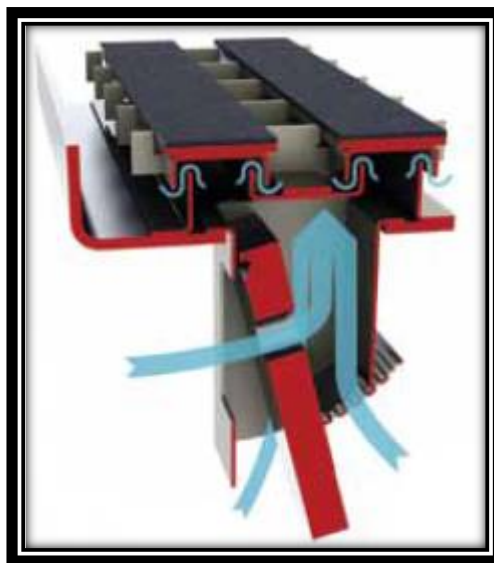


Figura 3.5 Regulador de Fluxo Mecânico. A azul encontra-se as possíveis entradas de ar

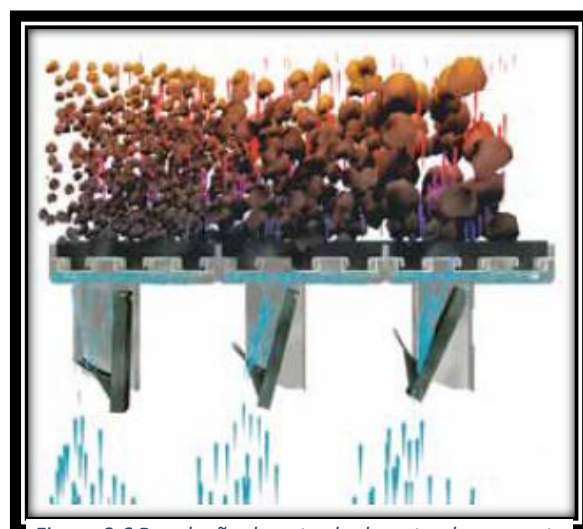


Figura 3.6 Regulação da entrada de ar tendo em conta a granulometria do clínquer no arrefecedor

Este tipo de arrefecedor trouxe bastantes benefícios, tanto a nível de gastos energéticos, como uma melhoria no *design* do equipamento que permitiu obter um clínquer com maior qualidade. Desta forma destacam-se algumas vantagens [29,31]:

- Maior rendimento e capacidade com a mesma área de grelha;
- Controlo da temperatura do clínquer mesmo em condições da altura da camada elevada;
- Menos desgaste do material e uma manutenção do material mais facilitada;
- As peças que constituem o clínquer apresentam maior durabilidade e menos desgaste;
- Melhorias na troca térmica e no consumo de energia;
- Este tipo de arrefecedor apresenta uma fácil e rápida instalação e apresenta um nível de investimento atraente face à qualidade do arrefecedor;
- Fácil adaptação a arrefecedores de gerações mais antigas.

Para além do arrefecedor *Cross-Bar* desenvolvido pela *FLSmidth*, existe outros arrefecedores que se encaixam nesta geração, nomeadamente, o *PolyTrack – Polysius* e o *EtaCooler – ClaudiusPeters*.

3.2.4 4ª Geração – *RevolvingDiscCooler*

Desenvolvido pela *CemProTec*, o arrefecedor de disco rotativo (RDC) representa uma visão de uma nova linhagem de arrefecedores, permitindo a troca de calor de fluxo cruzado e o tempo de residência está estimando para 30 min, enquanto as outras gerações rondam os 40 min [32]. Representa uma nova linhagem de arrefecedor sendo a sua taxa de funcionamento de menos de 10% em todo o mundo.

Os eixos que ligam o forno ao arrefecedor são perpendiculares, o que permite que o clínquer ao ser descarregado cai uniformemente, ou seja, sem que haja a divisão de clínquer mais fino ou mais grosso a tender para um dos lados. Isto só é possível devido ao sistema de distribuição de clínquer (CDS) que trabalha em movimento alternativo, a sua localização é acima do disco de rotação lenta, que está coberta por uma camada de clínquer de proteção.

A superfície de grelha é formada por uma lâmina grelha inteligente (*BLADES*) que tem a capacidade de manter a grelha sempre livre para que a troca térmica seja realizada corretamente, não sendo necessário sistemas de manuseio e transporte de poeiras. As paredes dos compartimentos estão em estado estacionário e bem seladas. Debaixo do disco rotativo existe um certo número de compartimentos gaseificados, conforme a quantidade de clínquer a ser produzida que fornecem o ar de arrefecimento para o sistema de lâmina grelha e para o caudal de clínquer.

Um dispositivo de remoção especial descarrega o clínquer para um britador de rolo, localizado na parte final do arrefecedor e exterior a este. Apenas uma camada de clínquer de proteção permanece dentro do arrefecedor de modo a proteger a superfície contra o clínquer quente [32].

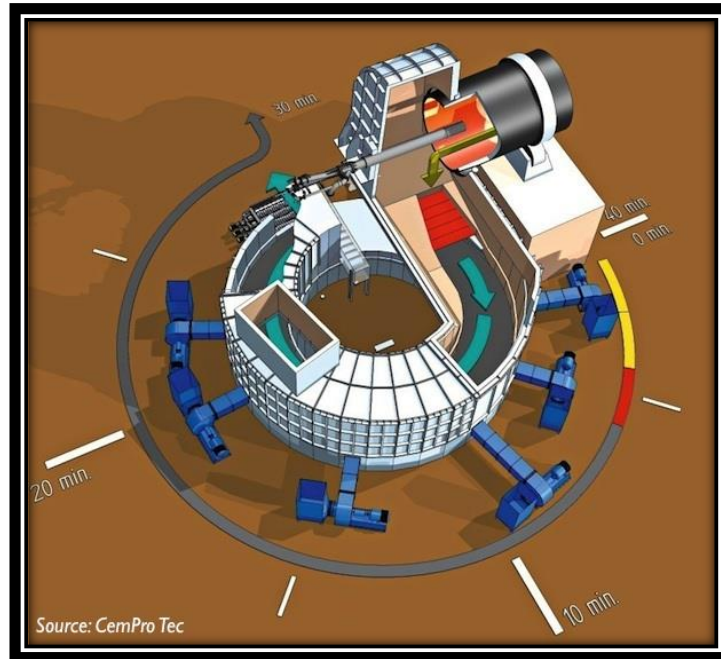


Figura 3.7 Arrefecedor de 4ª geração. Fonte: CemPro Tec

O RDC é um conceito de arrefecedor de clínquer simples e único, tendo como principais características e vantagens [33]:

- Pode ser desenvolvido para qualquer capacidade de forno;
- 100% na eficiência de transporte;
- Maior eficiência do processo – fluxo cruzado perfeito com o permutador de calor;
- Desgaste e manutenção muito diminutas;
- Queimador curto;
- Baixo volume de ar de arrefecimento, logo menos ar de escape;
- Baixo consumo de energia;
- Operação simples.

3.3 Definição: Arrefecedor de Grelhas

A caracterização seguinte deve-se ao arrefecedor de grelhas de 1ª geração, equipamento que se encontra na fábrica CMP – Maceira do grupo Secil. A otimização irá incidir nos dois arrefecedores presentes na fábrica, embora grande parte dos ensaios seja realizado no arrefecedor da linha 6.

Os arrefecedores presentes na linha 5 e 6 são iguais foram instalados na fábrica CMP-Maceira em 1986, são arrefecedores construídos pela empresa *Gatx-Fuller* do tipo 7X17H.7X32H.NS da empresa *Gatx-Fuller*, agora *FLSmidth* de 1ª geração, com capacidade de 58 ton/h. Apresentam as seguintes dimensões: 3,088 metros de largura, 18,245 metros de comprimento e 2,975 metros de altura. A primeira grelha ocupa 2,560 metros de comprimento, sendo o restante ocupado pela segunda grelha [33].

A temperatura de entrada do clínquer para dentro do arrefecedor apresenta um valor nominal de 1370°C e a temperatura de saída do clínquer para uma granulometria de 0 a 25 mm de 78°C mais a temperatura ambiente (neste caso a temperatura referência no livro sobre o arrefecedor é de 25°C).

Pela figura seguinte é possível visualizar as entradas e saídas do arrefecedor de grelhas [14].

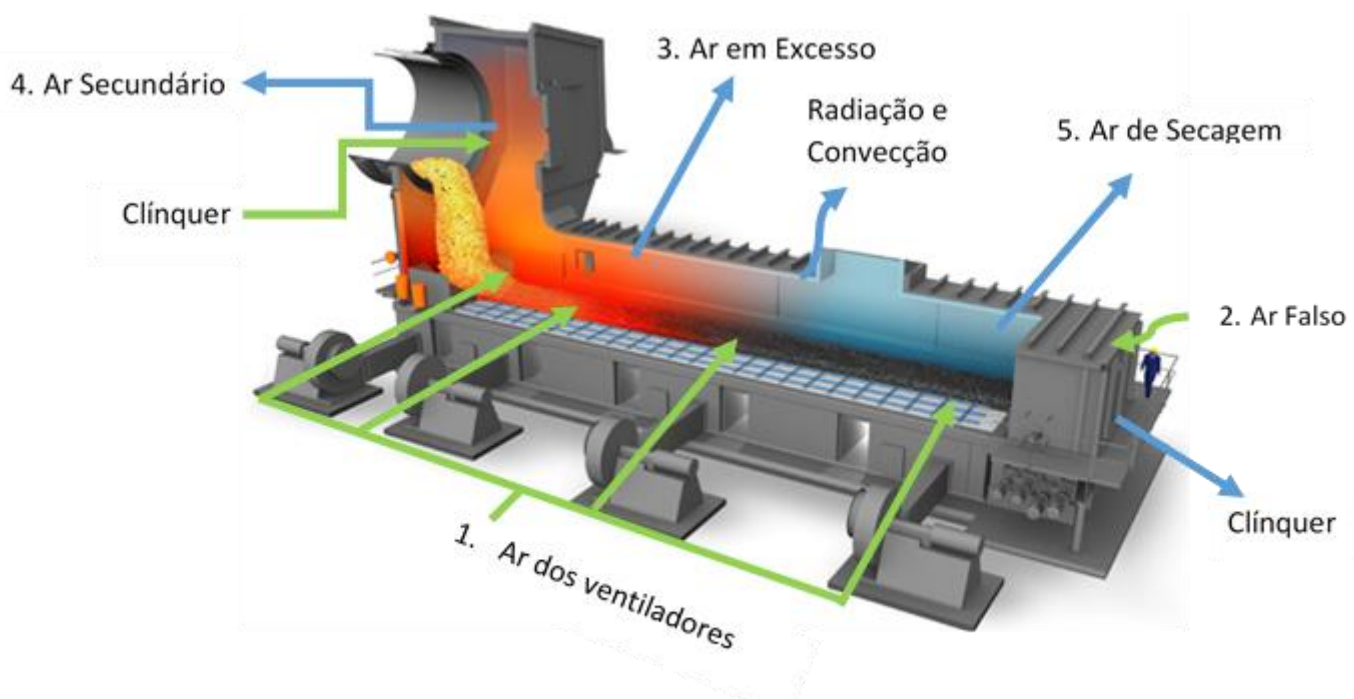


Figura 3.8 Esquema das entradas e saídas de um arrefecedor de grelhas

1. Ar dos ventiladores: é o ar que entra a partir de ventiladores para o arrefecedor que irá permitir arrefecer o clínquer e em contra partida este irá aquecer.

2. Ar Falso: é ar frio que entra por sítios que já não estão vedados corretamente. É um ar que é indesejado, pois irá ter um impacto negativo dentro do arrefecedor, nomeadamente no ar secundário, pois há redução do calor de recuperação e consequentemente haverá mais ar em excesso.
3. Ar em excesso: normalmente o ar que é insuflado pelos ventiladores está em excesso e então esse ar será despoeirado e expelido para o ambiente através de uma chaminé.
4. Ar secundário: é o ar que vai para o forno e o seu fluxo é determinado pelas necessidades da combustão na zona de cozedura.
5. Ar de secagem: é o ar que é utilizado para a secagem de matérias-primas, por exemplo na moagem de carvão.

Radiação: a radiação é forma de propagação de calor através de ondas eletromagnéticas, sem recorrer ao contacto entre os corpos, neste caso entre o clínquer e a estrutura do arrefecedor.

Convecção: é a transferência de calor que ocorre nos gases e nos líquidos. Neste caso estamos a falar do ar de arrefecimento aquece pelo contacto com o clínquer e este irá transferir o calor para a estrutura do arrefecedor.

Para além do funcionamento do arrefecedor é importante conhecer os outros equipamentos constituintes do arrefecedor nomeadamente os ventiladores, as placas da grelha, o britador de martelos e as condutas.

3.3.1 Ventiladores

Os 5 ventiladores são ventiladores centrífugos. Um ventilador centrífugo consiste num rotor, com carcaça de conversão de pressão e um motor. O ar entra pelo centro do rotor, sendo acelerado pelas pás gerando uma forte impulsão contra as paredes da carcaça que devido às suas características construtivas, direciona o ar para fora da abertura de descarga [35].

Os ventiladores são da marca *Solyvent*, e apresentam diferenças de dimensões e motores diferentes, no anexo III é apresentado as características de cada ventilador, bem como de cada motor.

3.3.2 Placas

As grelhas são constituídas por placas. As placas são “quadradas” constituídas por orifícios circulares, onde o ar passa. São construídas essencialmente de cromo, níquel e silício e por outros elementos em menores quantidades. Consoante o sítio onde a placa se encontra esta apresenta características na sua composição química de modo a assegurar a sua resistência face às temperaturas e pressões a que se encontra, de modo a evitar o seu desgaste prematuro, como é possível ver no anexo IV.

Existem 2 grelhas, a primeira grelha é onde cai o clínquer, apresenta dimensões menores, enquanto a segunda grelha é maior, mais constante e realiza o efeito de vai-e-vem.

3.3.3 Britador de Martelos

Os britadores de martelos foram desenvolvidos para reduzir a granulometria de materiais com dimensões médias e são usados principalmente por indústrias de cimento, calcário e gesso [36].

O britador presente é um britador de martelos de um eixo que está instalado após o fim da 2ª grelha, mesmo ainda dentro do arrefecedor e apresenta a mesma largura deste. Este apresenta uma roldana de martelos e uma placa de esmagamento, a roldana de martelos gira em movimento horário, quer a velocidade, quer a distância entre a roldana e a placa podem ser ajustadas, tendo em conta o tamanho do clínquer e também de modo a evitar um desgaste desnecessário [15]. A distância entre as placas e a velocidade do martelo determinam o tamanho máximo do produto, neste caso ambos os arrefecedores trabalham com uma distância de 30mm [30].



Figura 3.9 Britador de martelos

3.3.4 Condutas

Existem 3 condutas que saem do arrefecedor. A conduta do ar de secagem, constituída maioritariamente por aço. A conduta de ar de despoeiramento que segue para o filtro de mangas que posteriormente segue para a chaminé. E por fim a conduta que vai para a chaminé.

3.3.5 Equipamentos presentes no tratamento do ar em excesso do arrefecedor

Ventilador de exaustão

O ventilador de exaustão embora não seja um equipamento relacionado diretamente com o arrefecedor apresenta uma grande função, de modo a garantir o bom funcionamento do arrefecedor. É responsável por sugar o ar em excesso presente no arrefecedor até à chaminé e garantir que a pressão no cabeçote seja sempre negativa.

O ar em excesso sai do arrefecedor e segue até à caldeira, seguindo até ao permutador de arrefecimento, que posteriormente passará por um filtro de mangas e por fim segue para a chaminé, onde é libertado para a atmosfera.

Caldeira de climatização

A caldeira de climatização encontra-se logo após o arrefecedor. A instalação de uma caldeira no sistema de exaustão de ar em excesso surgiu recentemente na fábrica. A caldeira tem como função o aquecimento de água para uso na fábrica, como por exemplo para os ar condicionados ou água quente nas torneiras das casas de banho.

O ar entra lateralmente à caldeira, percorrendo a caldeira até ao topo e segue para o permutador. Em contra partida, o ar ao passar pela caldeira aquece a água até uma temperatura de 95°C, pois o objetivo é que a água não evapore.

Permutador gás/gás

O permutador de arrefecimento têm a função de garantir que a temperatura do ar em excesso não ultrapasse os 120°C. O ar em excesso após passar pela caldeira, segue para o permutador, onde a sua temperatura será reduzida para seguir para o filtro de mangas. O filtro de mangas consegue suportar temperaturas inferiores a 120°C, para isso é importante que o ar em excesso apresente essa temperatura, para não arder o filtro de mangas, para isso recorre-se ao uso de um permutador que com o auxílio do ar ambiente arrefece o ar em excesso para uma temperatura com um set-point de 105°C.

Filtro de mangas

O filtro de mangas encontra-se antes da chaminé e apresenta três princípios fundamentais, filtra as partículas do efluente gasoso, deposita de forma gravítica o bolo das partículas e remove as partículas da base do filtro. Apresenta uma elevada eficiência na captação das partículas, mas apenas se os três princípios atrás mencionados funcionarem de forma adequada.

A eficiência de remoção das partículas depende da dimensão das mesmas, assim o filtro de mangas apresenta elevadas eficiências para partículas acima de 0,1 a 100mm [37].

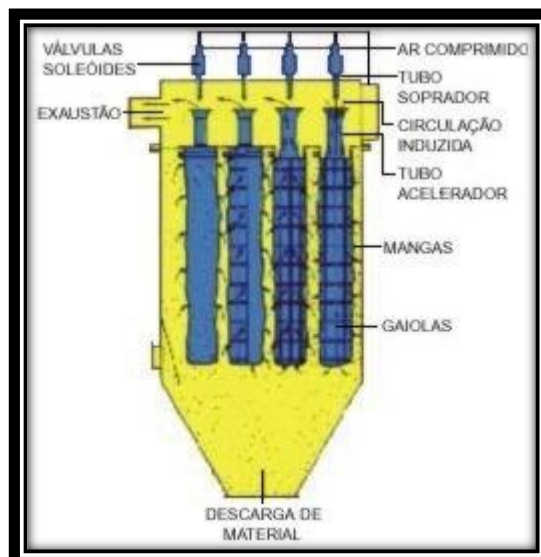


Figura 3.10 Filtro de Mangas [38]

O modo de funcionamento é simples. O ar com partículas entra no filtro de mangas e sofre uma queda da sua velocidade, de modo que as partículas de maiores dimensões se depositem na base do filtro. As partículas de menores dimensões vão em direção às mangas onde ficam retidas externamente à manga e o ar segue por entre as mangas e segue para a chaminé.

3.4 Controlo e Manutenção dos Arrefecedores de Grelhas

O controlo e manutenção de um equipamento é de extrema importância. A manutenção assegura o bom funcionamento do equipamento, garantindo que sejam desempenhadas intervenções oportunas de forma a evitar uma avaria permanente ou uma diminuição de rendimento, permitindo que sejam repostas as condições de operação o mais brevemente possível e com um custo otimizado [40]. No caso da fábrica CMP-Maceira a manutenção é controlada tendo em conta o programa de gestão da manutenção (SAP).

O SAP tem como principais funções: planeamento e controlo das tarefas de manutenção, fazer um histórico e estatísticas das manutenções efetuadas: tarefas realizadas, dados técnicos, avarias, custos de manutenção, etc. Apresentar uma lista de todos os equipamentos montados e fornecer uma visualização da estrutura de uma área/objeto técnico. O objeto técnico pode ser montado/desmontado em vários locais de instalação [40].

Loc. instalação	FM	Denominação	Vál. desde
		FABRICA MACEIRA	25.08.2015
FM-EDI		EDIFÍCIOS FABRIS	21117001
FM-CLI		CLIMATIZAÇÃO	21117001
FM-SAN		SANEAMENTO FABRIL	21117002
FM-ARR		ARRUMAMENTOS FABRIS	21117002
FM-JAR		JARDINS DA FÁBRICA	21117001
FM-ILU		ILUMINAÇÃO FABRIL	21117002
FM-TER		TERRENOS	21117003
FM-MAN		MANUTENÇÃO	21117011
FM-FAB		FABRICAÇÃO	21110006
FM-FED		FEDREIRAS	21110006
FM-BRS		BRITAGEM 5	21111001 010
FM-FHO		PRÉ-HOMO	21111001 010
FM-MCR		COMUNS MOAGENS CRÚ	21112011 010
FM-MF1		MOAGEM FILER 1	21112017 010
FM-MCS		MOAGEM CRU 5	21112009 010
FM-HO		HOMOGENEIZAÇÃO	21113010 020
FM-MC6		MOAGEM CRU 6	21112010 010
FM-CO2		COMUNS À COZEDURA	21113014 020
FM-CZ5		COZEDURA 5	21113012 020
FM-CZ6		COZEDURA 6	21113013 020
FM-MCV		COMUNS MOAGENS CARVÃO	21113004 020
FM-CV1		MOAGEM CARVÃO 1	21113006 020
FM-CV2		MOAGEM CARVÃO 2	21113007 020
FM-FUE		FUEL	21113001 020
FM-PNE		ALIMENTAÇÃO PNEUS	21113002 020
FM-PCA		PARQUE DE COMBUSTÍVEIS ALTERNATIVOS	21113003 020
FM-CIM		COMUNS ALIMENTAÇÃO MOAGENS CIMENTO	21114027 010
FM-FRE		PRÉ-MOAGEM	21114020 030
FM-MC7		MOAGEM CIMENTO 7	21114017 030
FM-MC8		MOAGEM CIMENTO 8	21114018 030
FM-MC9		MOAGEM CIMENTO 9	21114019 030 X
FM-MCI		COMUNS ÀS MOAGENS DE CIMENTO	21114021 030
FM-TME		TRANSPORTE MECANIZADO	21114025 030
FM-EMB		EMBALAGEM	21115004 030

Figura 3.11 Lista de estrutura - SAP

Enquanto o controlo, consiste num sistema de supervisão, no caso da fábrica Maceira-Liz os sistemas de supervisão foram desenvolvidos à medida da fábrica utilizando diferentes fornecedores, como a *Schneider* e *Foxboro*. Estes sistemas permitem aos operadores das salas de comando controlar o arranque e paragem dos diversos tipos de instalações. O controlo do processo por parte do operador é feito através da análise da informação disponível nos sistemas de supervisão, pois permite fazer a resolução de problemas através da ajuda de gráficos e de listas de alarmes disponíveis [40]

Com a automatização e desenvolvimento dos computadores e de *softwares*, os sistemas de otimização (*experts systems*) são cada vez mais comuns e permitem ao operador uma maior análise do processo, para que possa otimizar ao máximo a produção. Os *experts systems* são aplicados aos fornos, arrefecedores e moinhos de cimento através de *softwares* que são programados em modelos matemáticos utilizando filosofias de *Fuzzy Logics*, redes neuronais, *Mathlab*. Estes tipos de sistemas vão interagir diretamente com os autómatos e/ou sistemas de supervisão. Neste caso o sistema de otimização usado na fabricação é o SIMEQ [40].

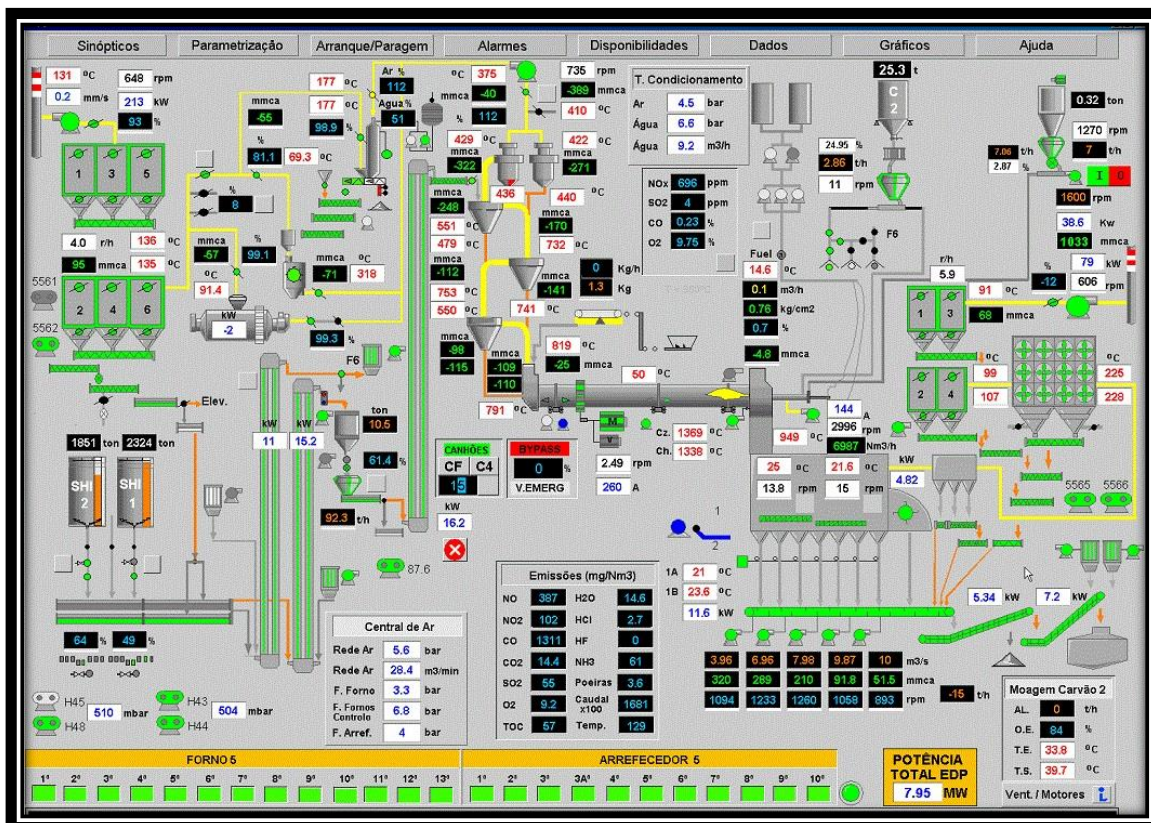


Figura 3.12 Sinótico da linha de produção 5 - SIMEQ

A partir do SIMEQ é possível retirar as várias variáveis de controlo que é necessário ter em conta, são elas [41]:

- A temperatura do clínquer à saída do arrefecedor é medida a partir de uma sonda de infravermelhos que mede a temperatura do clínquer em tempo real. A temperatura deve ser tão baixa quanto possível, pois se a temperatura permanecer elevada poderá avariar os sistemas de transporte e levar a uma perda de calor que é valiosa como o ar secundário;
- O ar em excesso é sugado pelo ventilador de exaustão e a temperatura deste deve ser o mais baixo possível e o seu volume idem, para que a quantidade de calor que é desperdiçado para a atmosfera seja mínima;
- A depressão no cabeçote (entrada do arrefecedor/parte final do forno) deve ser sempre ligeiramente negativa, pois representa a sucção de ar secundário que vai para o forno;
- A espessura da camada de clínquer deve ser tal que permita uma passagem franca de ar de arrefecimento através dela;
- Os valores de controlo devem ser os mais estáveis possíveis, de modo que a unidade de acionamento da grelha, britador de clínquer e paredes do arrefecedor nunca estejam sobreaquecidos.

A quantidade de ar secundário é controlada pelo ventilador de exaustão e pela pressão no cabeçote do forno que deve ser sempre negativa. O objetivo é garantir que a pressão no cabeçote seja constante, sendo o ventilador de exaustão a variável que controla a pressão no cabeçote.

A variável controladora suga mais ou menos ar em excesso, de modo a garantir que o set-point da pressão no cabeçote seja sempre o mais constante possível ($-\Delta P_1$), isto faz com que entre maior quantidade de ar secundário para dentro do forno. Pode afirmar-se que quanto maior a depressão no cabeçote do forno maior a quantidade de ar secundário que vai para dentro do forno.

É importante salientar que a quantidade de ar secundário é determinada pelo queimador e pela tiragem do forno, ou seja, sempre que as exigências no forno sejam menores, o ventilador de exaustão suga mais ar em excesso (AE), aumentando a sua velocidade e consequentemente menos ar secundário irá para o forno e o mesmo acontece inversamente.

Pela figura seguinte pode observar-se o esquema do arrefecedor para o controlo da pressão no cabeçote do forno.

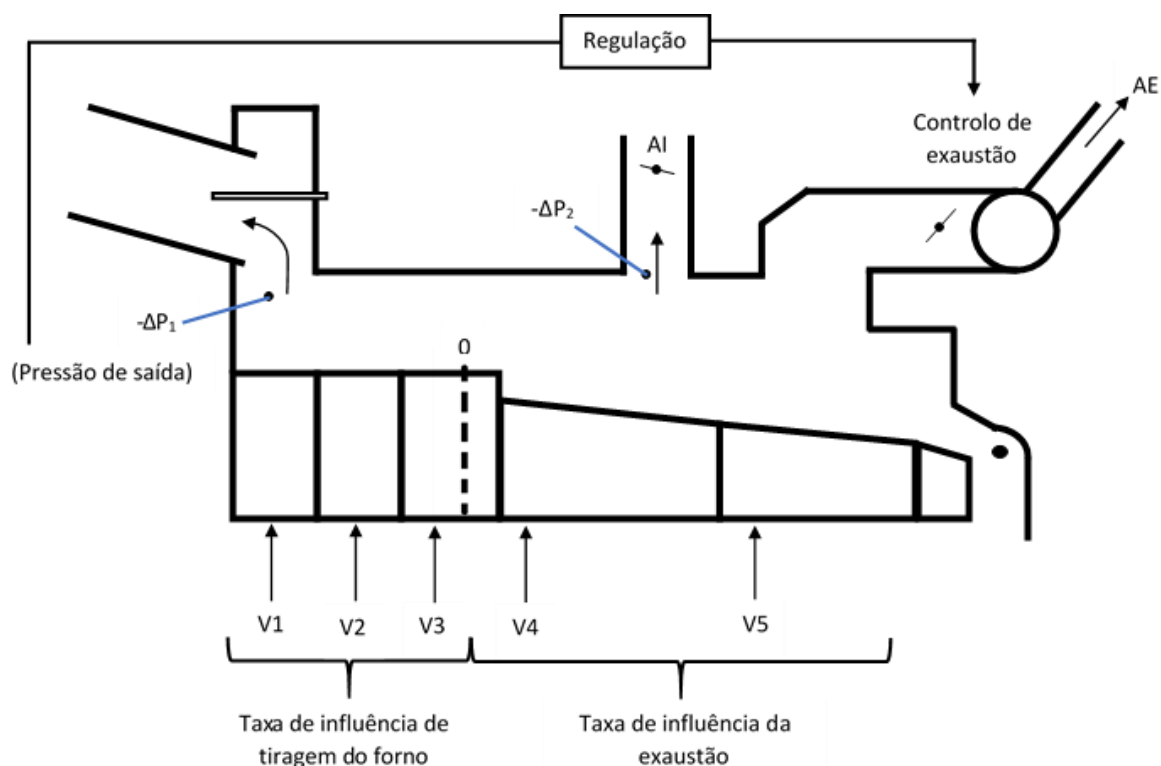


Figura 3.13 Controlo da depressão no cabeçote do forno

Tabela 3.1 Controlo da depressão no cabeçote no mínimo e máximo de funcionamento [43]

Ocorrência	Ação
<i>Depressão no cabeçote do forno alta > 10mmCA</i>	Reduzir a velocidade do ventilador de exaustão
	Aumentar caudal do V5
	Aumentar caudal do V4
	Aumentar a velocidade do ventilador de exaustão
<i>Depressão no cabeçote do forno baixa < 4mmCA</i>	Diminuir caudal do V5
	Diminuir caudal do V4

Inicialmente o valor para a depressão no cabeçote no forno era de -2 mmCA, sendo agora este valor oscilante entre -7 ± 3 mmCA [43].

Controlo do ar intermediário – Ar para a moagem [42]

O ar intermediário (AI) é sugado por um ventilador que se encontra após o moinho de carvão. O controlo aplicado é idêntico ao controlo do ar secundário, ou seja, o ventilador suga o ar criando uma depressão na conduta do ar do carvão ($-\Delta P_2$) (ver figura 3.13 acima). Essa depressão irá garantir que o ar está a ser sugada corretamente. O ar sai da conduta e é conduzido para dois ciclones, com a função de separar o clínquer do ar.

Posteriormente o ar segue para o moinho de combustível de sólido primário. O ar tem a utilidade de secar o coque, ou seja, eliminar a humidade presente neste. Após isso, o coque segue com ar e é separado no separador.

O controlo aplicado é na temperatura de saída do carvão, que não pode exceder os 70°C, pois como é um combustível, pode ocorrer o risco de explosão. Assim é exigido um set-point de 70°C que é controlado pela velocidade do ventilador. Quanto maior a velocidade em rpm do ventilador, maior a entrada de ar no moinho e consequentemente maior a depressão no início da conduta, o que sugere que a temperatura está baixa. Caso a temperatura seja alta é puxado menos ar e consequentemente quer a velocidade do ventilador quer a depressão na conduta são menores.

Controlo da altura da camada de clínquer no arrefecedor [42]

A altura da camada é calculada usando a pressão do ventilador 2, assim pode afirmar-se que a pressão do ventilador 2 é igual à altura da camada de clínquer.

A altura da camada de clínquer no arrefecedor é controlada pela velocidade da primeira grelha. O objetivo é que a altura da camada seja constante dentro do arrefecedor, de modo a garantir uma entrada e saída de clínquer o mais constante possível, de modo a evitar acumulações na segunda grelha ou o inverso.

A variação da altura da camada será detetada pela pressão do V2 e nas variações de pressão do segundo compartimento. Esta pressão é igual à perda de carga através das grelhas além da camada de clínquer, quando não existe pressão permanecendo acima da camada. A altura da camada será reduzida para o valor adequado por ação da velocidade das grelhas.

Não deve haver qualquer pressão residual acima da camada. Portanto, é importante ajustar corretamente a altura da camada de clínquer. Pela tabela seguinte é possível verificar qual deverá ser a altura da camada tendo em conta a velocidade da 1ª e 2ª grelhas e a quantidade de clínquer a ser produzido.

Tabela 3.2 Velocidade das grelhas consoante a altura da camada e da produção

	Velocidade (t/min)	Altura da cama (mm)
1300T/J		
1ªGrelha	7,9	500
2ªGrelha	15	250
	13	300
1700T/J		
1ªGrelha	10,3	300
2ªGrelha	17	

Controlo da velocidade da 2ªGrelha [42]

O controlo da velocidade da 2ªgrelha faz-se tendo em conta a relação entre a velocidade das duas grelhas, ou seja uma razão em percentagem:

$$\text{Razão} = \frac{\text{velocidade } G2}{\text{velocidade } G1} \%$$

Desde que os arrefecedores foram instalados na fábrica a razão era de 10%, ou seja a velocidade da 2ªgrelha era maior em 10% em relação à velocidade da 1ªgrelha.

Esta relação também permite um controlo na altura da camada de clínquer. É importante que ambas as grelhas andem em sintonia de modo a evitar que a camada de clínquer não seja constante em todo o arrefecedor.

Na figura seguinte a altura da camada de clínquer na 2ª grelha é muito mais baixa tendo em conta a altura da camada na 1ª grelha, o que acontece é que a pressão na primeira grelha é maior em comparação à pressão na segunda grelha, o que faz com a velocidade da grelha 1 aumente e consequentemente a velocidade da grelha 2 também irá aumentar devido à razão entre ambas. Assim iremos ter sempre menos camada na grelha 2, pois a sua velocidade é maior, levando a um desgaste das placas. Na grelha 1, haverá um excesso de calor o que leva a um desgaste das placas e os ventiladores irão trabalhar em maior esforço.

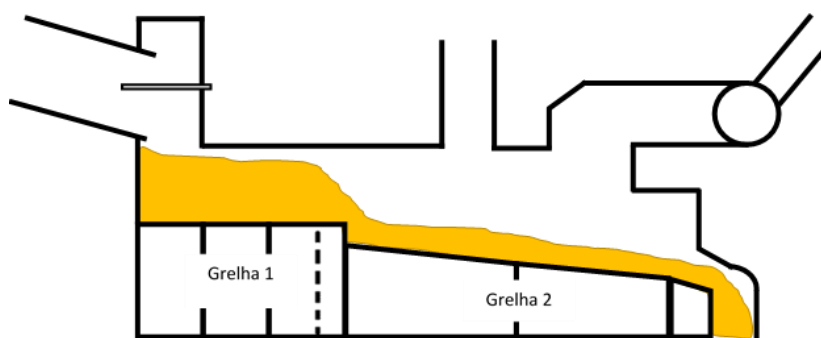


Figura 3.14 Quantidade de clínquer na grelha 1 tendo em conta a velocidade

O mesmo pode acontecer inversamente. Maior quantidade de clínquer na grelha 2. Existe uma diminuição da pressão na grelha 1 e consequentemente menor velocidade, se há menos velocidade na grelha 1, a grelha 2 também terá menor velocidade, o que leva a uma acumulação de clínquer na grelha 2. Isto pode gerar um aquecimento do clínquer, o que não é desejável.

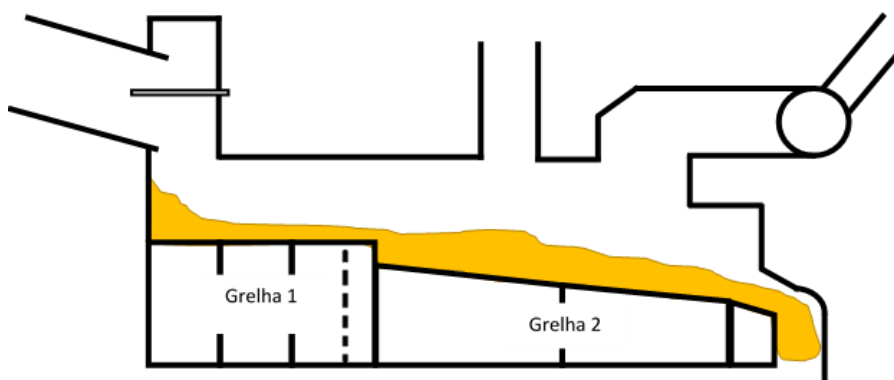


Figura 3.15 Quantidade de clínquer na grelha 1 tendo em conta a velocidade

Controlo do caudal dos ventiladores de entrada de ar [42]

Os ventiladores de entrada de ar para dentro do arrefecedor são controlados através da velocidade dos seus motores, ou seja, é definido um set-point de caudal para cada ventilador consoante a quantidade de farinha que está a ser alimentada no forno e de modo a manter constante esse set-point a velocidade de cada motor dos ventiladores é alterada, baixando ou aumentando o seu valor.

Pela tabela seguinte é possível ver qual o caudal de cada ventilador para a quantidade de farinha ao forno, também é possível observar as condições iniciais aquando da instalação dos arrefecedores e quais os valores atuais usados na fábrica.

Tabela 3.3 Condições iniciais e atuais dos ventiladores do arrefecedor

Condições Iniciais e Condições Atuais para os V1, V2 e V3											
Farinha (ton/h)	35	41	48	55	62	69	76	83	90	96	>98
V1 (m³/s)	3,7	3,7	3,7	3,7	3,7	3,7	3,7	3,7	3,7	3,7	3,7
V2 (m³/s)	5	5,2	5,4	5,6	5,8	5,9	6	6,1	6,1	6,2	6,3
V3 (m³/s)	5	5,5	6	6,4	6,7	7	7,2	7,4	7,6	7,7	7,8
Condições Iniciais para os V4 e V5											
V4 (m³/s)	6,3	7,6	8,7	9,8	10,7	11,4	12,1	12,6	12,9	13,2	13,5
V5 (m³/s)	5	6,4	7,8	9,2	10,5	11,6	12,6	13,4	14	14,5	14,8

As condições para o V1, V2 e V3 permaneceram iguais, o mesmo não aconteceu com o V4 e V5. O caudal destes ventiladores deixou ter um controlo tão apertado sendo a única imposição manter o caudal destes ventiladores o mais estável possível desde que seja mantido o valor estipulado para a depressão no cabeçote do forno. Outra diferença observada também para o V4 e V5 é o valor dos caudais que já não atingem os valores das condições iniciais, sendo os seus valores mais baixos.

Controlo da Torre de Arrefecimento

Embora não seja um controlo realizado diretamente no arrefecedor, este controlo irá influenciar o desempenho do arrefecedor, daí ser importante mencionar. Consiste no controlo da temperatura do ar em excesso que vai para o filtro de mangas, definindo um set-point a partir da variação da velocidade dos ventiladores dos permutadores da torre de arrefecimento.

O ar em excesso passa pelos permutadores de arrefecimento e a sua temperatura vai baixar de modo a garantir que o ar em excesso apresenta uma temperatura não superior a 120°C para seguir para o filtro de mangas. O arrefecimento do ar em excesso é realizado fazendo insuflar ar atmosférico para dentro do permutador a partir dos ventiladores. A quantidade de ar atmosférico é controlada por um registo existente no permutador que abre ou fecha consoante a temperatura do ar em excesso.

Assim sempre que a temperatura do ar em excesso é elevada em comparação ao set-point exigido, a velocidade dos ventiladores do permutador aumentam e conseqüentemente há mais entrada de ar atmosférico, enquanto se a temperatura do ar em excesso for pequena em relação ao set-point de 105°C a velocidade dos ventiladores do permutador diminui.

Controlo da Caldeira de Climatização

A caldeira de climatização como mencionado acima tem a função de aquecer água para usufruto da própria empresa. O ar em excesso passa pela caldeira e irá aquecer a água. Se o ventilador de exaustão estiver com rpm baixo, o ΔP irá ser baixo e concludentemente haverá menos aproveitamento dos gases no aquecimento da água. Enquanto se o ventilador estiver a funcionar com elevada velocidade, o ΔP da caldeira aumenta e o aproveitamento dos gases é maior.

Valores de controlo das variáveis presentes no arrefecedor

Para além das variáveis controladas acima mencionadas, existem outras variáveis que podem ser controladas, sem que estas tenham um impacto direto na eficiência do arrefecedor.

A pressão na câmara 2 é de 320±40mmCA inicialmente estipulada como sendo de 360mmCA, esta pressão é determinada em função da permeabilidade do leito de clínquer e da velocidade da grelha 1.

Tabela 3.4 Controlo da velocidade da grelha 1 tendo em conta a pressão na câmara 2

Ocorrência	Ação
<i>Pressão na câmara 2 > 360mmCA</i>	Aumentar a velocidade na grelha 1
<i>Pressão na câmara 2 < 280mmCA</i>	Reduzir a velocidade na grelha 1

Para além das grelhas, existe as câmaras de cada ventilador, que também devem apresentar uma certa pressão:

Tabela 3.5 Pressão normal e máxima nas câmaras

Câmaras	Pressão normal das câmaras (mmCA)	Pressão máxima nas câmaras (mmCA)
1	380 a 440	500
2	320 a 380	480
3	220 a 300	380
4	120 a 200	250
5	80 a 140	160

Problemas que podem ocorrer num arrefecedor se o controlo não for bem feito

Existem vários problemas que podem ocorrer num arrefecedor de grelhas, e alguns desses problemas também podem verificar-se também em arrefecedores planetários, caso o controlo das variáveis acima mencionadas não for corretamente realizado [14].

- a. Segregação: o clínquer é elevado pela rotação do forno antes de ser escoado para o arrefecedor, isso provoca uma descarga de partículas quer finas e grossas e estas diferem entre si, logo as frações de clínquer não são uniformemente distribuídas pela grelha;
- b. Leito de clínquer fino na zona de recuperação: a espessura da camada de clínquer é diretamente limitada pela pressão do ventilador de arrefecimento instalado e indiretamente pela quantidade de vedantes do compartimento e pela distribuição do clínquer através da largura. Assim operar com camadas mais finas dá uma relação ar/clínquer desfavorável e uma fraca permuta de calor o que consequentemente irá resultar numa baixa eficiência de recuperação de calor;
- c. *Redriver* (rio vermelho): camadas com diferentes resistências e que tenham somente uma câmara através de toda a largura leva a que muitas vezes a camada fluidizada do clínquer assente por cima. Este clínquer fluidizado não consegue acompanhar a velocidade da grelha e avança mais depressa que o restante clínquer, o que faz com que chegue mais depressa ao britador e consequentemente forma uma camada vermelha muito quente;
- d. *Snowman* (boneco de neve): a consistência peganhenta do clínquer quente que sai do forno, combinada com a compactação no ponto de queda provoca a formação de montes de clínquer sólido na grelha. Em conclusão não há a passagem do ar de arrefecimento e o efeito bola de neve vai aumentando provocando a perturbação do fluxo do clínquer.

4. Materiais e Métodos

Neste capítulo é apresentado os materiais e métodos usados durante a realização da parte experimental. É apresentado a metodologia realizada para o arrefecedor 8 e para o arrefecedor 7. De modo a simplificar os objetivos do trabalho a parte experimental é dividida por duas partes.

A primeira parte consiste na realização um balanço mássico e energético ao sistema arrefecedor, medindo todos os caudais, bem como as temperaturas e pressões de todas as entradas e saídas do arrefecedor. Após o balanço energético calculado compara-se os valores obtidos com os valores teóricos de modo a avaliar a eficiência do arrefecedor.

A segunda parte constitui em controlar uma ou mais variáveis do arrefecedor durante um determinado tempo, de modo a obter vários ensaios, posto isto, calcula-se a eficiência para cada ensaio realizado.

4.1 Balanço Energético – 1ªParte Experimental

O balanço energético realizou-se ao arrefecedor 8 da linha de produção 5.

Um balanço energético terá em conta as saídas e entradas de um sistema e permiti-nos entender se há transferência ou armazenamento de energia e se esse sistema está a trabalhar em condições ótimas de modo a apresentar uma boa eficiência.

O balanço energético é a forma mais fácil de demonstrar que um equipamento está a funcionar dentro dos parâmetros corretos e uma das formas mais utilizadas para avaliar a eficiência de todo o processo.

As entradas e saídas de um arrefecedor são:

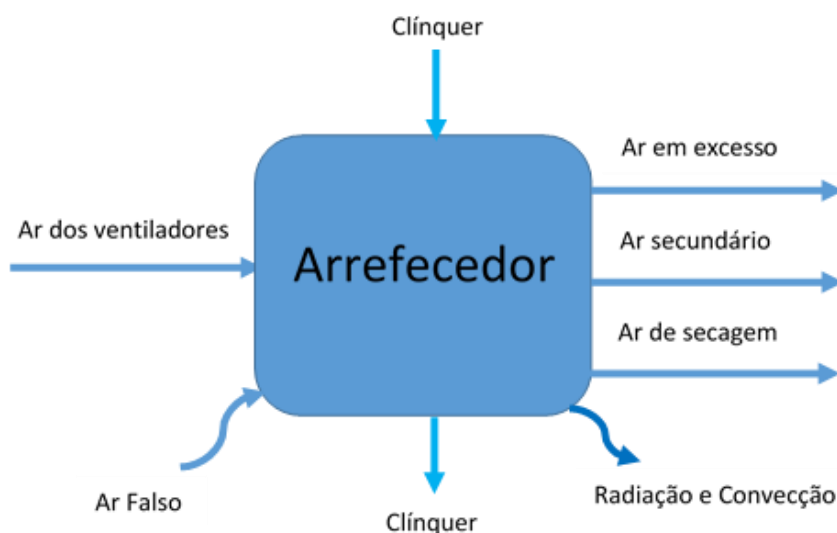


Figura 4.1 Esquema das entradas e saídas do arrefecedor

Como $\sum Q_E = \sum Q_S$ então o sistema considera-se fechado por isso a equação para o cálculo do calor a ser usada é:

$$Q = m \times c_p \times \Delta T \text{ (equação 1)}$$

Em que,

Q é o calor da variável medida em kJ/kg clínquer

m é a massa em Nm³/kg clínquer ou m³/kg clínquer

c_p é o calor específico a pressão constante em kJ/Nm³ °C ou kJ/kg °C

ΔT é a diferença de temperaturas em K

4.1.1 Condições de Medição

- Fronteira: Arrefecedor de Grelhas
- Período de medições: 12h, com início no dia 16 de Abril às 13h e término às 1h no dia 17 de Abril
- Período de paragem do moinho de carvão: das 16:45h até às 20:35h no dia 16 de Abril
- Período de paragem do forno: não houve paragem do forno durante o tempo do ensaio
- Alimentação de farinha ao forno: 92 ton/h
- Estado de referência: 20°C e 1 bar – ar atmosférico

De modo a ser possível medir alguns fatores em falta, bem como confirmar outros fatores medidos no software SIMEQ, tal como a temperatura das condutas, as pressões, caudais e velocidade do ar, é preciso ter noção de como trabalham os instrumentos utilizados para cada fator.

Medição da pressão

Tubo de Pitot [44]

Foi desenvolvido em 1732 pelo físico francês *Henri Pitot* e é utilizado para medir a pressão estática e a total de uma conduta de gases ou de fluídos.

O tubo de *pitot* proporciona um meio para determinar o diferencial de pressão dentro de uma região do plano de medição. Consiste em pelo menos duas tomadas, ou seja, a primeira fonte de pressão é a pressão total que pode ser tomada na extremidade do tubo de *pitot* através da sua entrada principal, relativa ao fluxo. A segunda tomada é a pressão estática que pode ser ou não tomada no mesmo sítio que a pressão total, se não for na extremidade será no corpo do tubo. A tomada da pressão estática precisa de estar localizada numa posição de ângulo reto ao fluxo laminar para uma melhor precisão.

Existe vários tipos de tubos de *pitot*, em tipo L, em S e em 3D. Todos eles funcionam semelhantemente.

Pela norma ISO 16911-1 podemos retirar a velocidade usando a seguinte fórmula:

$$v = K \times \sqrt{\frac{2 \times \Delta p}{\rho}}$$

Onde,

K é a constante do tubo de pitot

Δp é a pressão dinâmica em Pa

ρ é a densidade do gás efluente na conduta em kg/m³

Para o cálculo de densidade é possível ser calculada através da equação dos gases perfeitos, ou seja,

$$\rho = \frac{M \times p_c}{R \times T_c}$$

Onde,

M é a massa molar do gás efluente na conduta em kg/mol

p_c é a pressão absoluta medida na conduta em Pa

R é a constante dos gases perfeitos, como sendo, 8,314 J/(K mol)

T_c é a temperatura do gás na conduta em K

Para se poder calcular a pressão absoluta é necessário recorrer a uma equação que relaciona a pressão atmosférica e a pressão estática:

$$p_c = p_{atm} + p_{stat}$$

Onde,

p_{atm} é a pressão atmosférica em Pa

p_{stat} é a pressão estática medida na conduta em Pa

Medição da Velocidade

Anemómetro

São instrumentos que servem para medição da direção e indicar a velocidade dos ventos ou de outros fluídos em movimento. Neste caso específico a velocidade a medir são dos ventiladores de ar assim o tipo de anemómetro usado foi o termo anemómetro de micro hélice, que para além de medir a velocidade do ar também pode medir a temperatura.

Medição da Temperatura

PT100

O PT100 é uma termo resistência feita de platina, suporta temperaturas entre os -258 a 900°C.

Uma termo resistência é um sensor de alta precisão o seu funcionamento baseia-se na variação da resistência elétrica de modo proporcional à temperatura do meio em que é colocada. Usa como princípio o da agitação térmica dos metais, ou seja, quanto maior a temperatura maior é a resistência.

Pistola de Infravermelhos

A pistola de infravermelhos mede a temperaturas ou variações de temperatura de um objeto sem que seja necessário o contato entre ambos. É constituído por um sistema ótico e um detetor.

O sistema ótico foca a energia emitida por um objeto sobre o detetor. O detetor avalia o comprimento de onda específico que resulta da energia irradiada pelo objeto menos a energia absorvida.

Medição dos Caudais

Caudal de Clínquer

A quantidade de clínquer que sai do arrefecedor não tem um controlo específico. Este segue em telas transportadoras até ao silo de armazenamento.

Para se poder medir a quantidade de clínquer que sai, recorreu-se a uma camioneta e a uma balança. Inicialmente a camioneta foi pesada onde depois se tirou o seu peso e assim foi possível medir a quantidade de clínquer durante o tempo do balanço.

Para o cálculo da temperatura de saída de clínquer. Realizou-se por 2 métodos diferentes: pistola de infravermelhos e transferência de calor do clínquer para a água numa caixa adiabática e consequente medição da temperatura da água.

O segundo método teve como materiais um termo e um termómetro. Os passos a seguir para medir a temperatura do clínquer são:

1. Pesar o termo, colocar 2litros de água e medir a temperatura da água;
2. Buscar uma amostra de clínquer acabado de sair do arrefecedor e colocar dentro do termo;
3. Retirar a temperatura de x em x tempo até a temperatura se tornar estável;
4. Calcular o calor da água através da equação 1;
5. Aplicar o mesmo raciocínio para retirar a temperatura do clínquer:

$$\Delta T = \frac{Q_{H_2O}}{m_{cliquer} \times c_p}$$

Caudal de ar dos ventiladores

O arrefecedor quer da linha 5 e da 6 é constituído por 5 ventiladores todos eles com geometria circular. Como todos têm tamanhos diferentes mediu-se para cada um, o seu diâmetro para posteriormente calcula-se a sua área.

$$A = \pi \times r^2 \text{ (equação 2)}$$

Com o auxílio ao anemómetro foi possível retirar a velocidade de entrada. Retirou-se vários valores da velocidade tendo em diferentes posições e depois fez-se a média destes.

$$Q_{volumétrico} = velocidade \times A \text{ (equação 3)}$$

Este tipo de medição realizou-se apenas uma vez antes das 12h de balanço. O objetivo da medição foi para comparar se os valores que são medidos *online* no programa SIMEQ são iguais ou semelhantes aos medidos manualmente.

Caudal de ar de secagem

Quando o moinho de carvão está a trabalhar, é necessário fornecer ar quente, de modo a retirar toda a humidade existente no carvão. Assim quanto mais húmido estiver o carvão, mais caudal de ar teremos que introduzir no moinho e o mesmo acontece inversamente, se for menos húmido, menos caudal de ar e menor gasto de energia.

Mas nem sempre o moinho de carvão está a trabalhar, então para realizar o balanço térmico é preciso ter em atenção as paragens que o moinho tem, tendo em conta o tempo que demora a realizar o balanço.

Para a medição deste caudal é necessário utilizar o tubo de *Pitot* do tipo S para se medir a pressão estática e a pressão total, a partir destes valores é possível retirar a velocidade e consequentemente o caudal da conduta. Para se retirar o valor da temperatura recorre-se ao aparelho PT100.

O caudal volumétrico é calculado segundo a equação 3.

Caudal de ar em excesso

O caudal de ar em excesso é retirado a partir da conduta que irá para a chaminé. Este caudal é tirado por um *software* que automaticamente nos dá logo o valor do caudal. Em relação à temperatura, esta é retirada usando o PT100.

Durante o balanço das 12h o caudal do ar em excesso foi medido 4 vezes. No dia 15 de Abril foi medido o caudal de ar em excesso mesmo na chaminé. Posteriormente comparou-se os valores para ver a quantidade de ar falso que existe. A razão desta medição, deve-se ao facto, de no *software* SIMEQ a variável a ser medida é o caudal na chaminé, assim

sabendo os caudais em cada posição é possível saber a diferença entre eles e usar essa diferença para futuros cálculos da eficiência.

Caudal de ar secundário

O caudal do ar secundário é retirado igualando as entradas e as saídas de ar, ou seja é retirado a partir de um balanço mássico, visto ser a única variável em estudo que não se consegue medir diretamente. Posteriormente, a temperatura deste pode ser retirada a partir do balanço energético.

$$Ar\ Secundário = Ar\ Ventiladores - (Ar\ secagem + Ar\ excesso) \text{ (equação 4)}$$

Embora a temperatura do ar secundário seja uma variável medida pelo programa SIMEQ *online*, essa temperatura tem apresentado valores muito elevados, então não foi tido em consideração para o cálculo da eficiência.

Radiação e Convecção

A radiação é calculada recorrendo à equação seguinte [25]:

$$Radiação = 4 \times 10^{-8} \times (T^4 - T_0^4) \times 4,187 \text{ (equação 5)}$$

Para a convecção recorreu-se à equação [25]:

$$Convecção = 80,33 \times \left(\frac{T + T_0}{2}\right)^{-0,724} \times (T - T_0)^{1,333} \times 4,187 \text{ (equação 6)}$$

T – temperatura média da superfície em K

T₀ – temperatura ambiente média em K

Quer a radiação quer a convecção vêm em kJ/h m² para as transformar em calor é necessário saber a área total do arrefecedor. A área foi retirada das plantas do arrefecedor.

$$\frac{Radiação}{Convecção} = \frac{A}{Quantidade\ de\ clínquer\ produzido} \text{ (equação 7)}$$

Assim é possível obter a radiação e a convecção em kJ/kg de clínquer.

4.1.2 Eficiência

Para o cálculo da eficiência é necessário ter em conta as entradas e saídas do arrefecedor. A eficiência do arrefecedor é definida pela relação entre o calor recuperado e o total de calor de entrada. As perdas de calor são, as perdas de calor do clínquer, de radiação e convecção e o calor do ar em excesso.

Assim é possível definir a eficiência por:

$$\eta = \frac{\text{Calor recuperado}}{\text{Calor de entrada}} \times 100\% \text{ (equação 8)}$$

O calor recuperado é o ar secundário e o calor que vai para a secagem do carvão. Enquanto o calor de entrada é composto pelo calor de entrada de clínquer e o calor de entrada do ar [30].

$$\eta = \frac{\text{Calor Ar Secundário} + \text{Calor Ar de Secagem}}{\text{Calor entrada de Clínquer} + \text{Calor entrada de Ar Ventiladores} + \text{Calor Ar Despoeiramento}} \times 100\% \text{ (equação 9)}$$

4.2 Ensaios – 2ª Parte Experimental

A partir do balanço energético realizado na primeira parte, foi possível ver quais os parâmetros que mais contribuíam para a eficiência, ou seja, os que mais impacto tinham para a contribuição do cálculo da eficiência, sendo estes, o calor de entrada e saída de clínquer, o ar em excesso e posteriormente calculado o calor do ar secundário. O calor do ar de entrada, o calor da radiação e convecção e o calor do ar de secagem não foi tido em conta para o cálculo da eficiência dos ensaios.

Outro fator a ser considerado foi o fator de ar falso. A medição realizada no dia antes do balanço energético permitiu saber qual a percentagem de ar falso que entrava no sistema. O caudal foi medido na chaminé e o caudal excedente do arrefecedor foi medido na conduta que sai do arrefecedor. Esse cálculo realiza-se fazendo:

$$\text{Fator} = \frac{\text{Caudal medido na chaminé} - \text{Caudal excedente do arrefecedor}}{\text{Caudal medido na chaminé}} \text{ (equação 10)}$$

Tabela 4.1 Cálculo da percentagem de ar falso

Horas	Caudal excedente do arrefecedor (Nm³/h)	Caudal medido na chaminé (Nm³/h)	Fator
13:38 – 13:55	89 457	122 806	0,272
15:04 – 15:17	94 891	132 300	0,283
Média			0,278
Percentagem			28%

De modo a saber a quantidade de clínquer que entra e sai do arrefecedor utilizou-se o fator de conversão usado na fábrica que transforma a quantidade de farinha ao forno em clínquer. O fator de conversão é 0,60. Este fator foi usado em todos os ensaios realizados. A razão do uso deste fator deve-se ao facto de ser um fator real e não um fator teórico, pois o fator teórico não tem em conta os finos que são arrastados ao longo do processo e ao facto de haver acumulação de material no sistema torre de ciclones/forno.

Os dados recolhidos para os cálculos da eficiência retiraram-se do programa SIMEQ, os parâmetros retirados foram, a temperatura de saída de clínquer, a quantidade de farinha que entra no forno, a temperatura do ar em excesso e o seu respetivo caudal, bem como a variável que está a ser estudada em cada ensaio. O calor de entrada e saída do clínquer, bem como do ar em excesso são calculados através da equação 1 acima descrita. O calor do ar secundário é retirado fazendo a diferença entre o calor das entradas e das saídas:

$$Caudal_{ar\ secundário} = Caudal_{entrada\ ar\ ventiladores} + Caudal_{ar\ despoeiramento} - Caudal_{ar\ excesso} - Caudal_{ar\ secagem} \text{ (equação 11)}$$

Para cada ensaio selecionou-se um intervalo e apenas nesse intervalo é que se efetua a eficiência para cada valor retirado, realizando-se a média das várias eficiências e o desvio padrão, de modo a perceber se a variável modificada fez o sistema oscilar mais ou menos.

Todas as variáveis que não sejam alvo de ensaios, permaneceram com os valores normais ou foram controladas manualmente pelo operador responsável pelo turno ou *online* pelo software SIMEQ.

A temperatura de entrada do clínquer foi assumida como sendo de 1370°C, valor retirado do documento fornecido pelo fabricante durante os ensaios de *performance* do equipamento.

De modo a ter como referência valores de comparação, inicialmente começou-se por retirar valores dos arrefecedores, de como este trabalha sem ter em atenção às variáveis controladas. Esses valores foram retirados em dias específicos, em que se alterou um parâmetro, ou a entrada da farinha ao forno, ou houve a necessidade de controlar um parâmetro, de modo a tornar o sistema mais estável.

Infelizmente para o arrefecedor 8, apenas se retirou esses dados, que iriam servir para comparação com ensaios futuros, mas por motivos de manutenção, houve a necessidade de fazer a paragem da linha. Na tabela seguinte é possível ver os dados retirados.

Tabela 4.2 Históricos do arrefecedor 8

Arrefecedor 8				
		Tempo de duração	Intervalo Selecionado	Parâmetros Controlados
Histórico 1		3 dias (27 a 29 de Junho)	29 de Junho das 4:30h às 11:50h	<ul style="list-style-type: none"> - Grelhas em controlo manual - Controlo dos ventiladores por set-point - Controlo do ventilador de tiragem pela depressão no cabeçote
Histórico 2		8 dias (29 de junho a 6 de Julho)	29 de Junho às 18:00h até 30 de Junho às 9:20h	<ul style="list-style-type: none"> - Manter constantes a as velocidades de rotação dos ventiladores V1, V2 e V3
Histórico 3		12 dias (14 de Abril a 26 de Abril)	20 de Abril às 23:00h até 21 de Abril às 8:00h	<ul style="list-style-type: none"> - Sistema de produção sem a introdução de pneus
Histórico 4	80 ton/h	1 dia (10 de Julho)	10 de Julho das 00:00h às 8:30h	<ul style="list-style-type: none"> - Menor quantidade de farinha ao forno
	85 ton/h	1 dia (7 de Julho)	7 de Julho das 18:00h às 21:40h	
	90 ton/h	1 dia (13 de Julho)	13 de Julho das 12:45h às 20:30h	

Para o arrefecedor estabeleceu-se o mesmo raciocínio, retirou-se dados do arrefecedor 7, para perceber o seu funcionamento sem a aplicação de nenhum controlo, para posteriormente se comparar com os ensaios realizados. Os dados retirados foram:

Tabela 4.3 Históricos do arrefecedor 7

Arrefecedor 7				
		Tempo de duração	Intervalo Selecionado	Parâmetros Controlados
Histórico 5	80 ton/h	3 dias (24 de Julho a 26 de Julho)	24 de Julho das 00:00h até às 9:50h	<ul style="list-style-type: none"> - Menor quantidade de farinha ao forno
	85 ton/h		24 de Julho das 16:30h até 25 de Julho às 10:15h	
	90 ton/h		25 de Julho das 19:30h até 26 de Julho às 13:35h	

Os ensaios realizados consistiram nos controlos que se realizam no arrefecedor, fixar as variáveis de controlo e perceber como funcionam as variáveis controladas.

Tabela 4.4 Ensaios realizados no arrefecedor 7

Arrefecedor 7		
	Tempo de duração	Variáveis Controladas
Ensaio 1	11 de Agosto das 9:35h às 17:30h (retirando o intervalo de 30 min em que houve uma anomalia no forno)	- Altura da camada de clínquer de 0,6m - Depressão no cabeçote de -6mmCA
Ensaio 2	11 de Agosto às 18:00h até 12 de Agosto às 9:15h	- Altura da camada de clínquer de 0,6m - Depressão no cabeçote de -4mmCA
Ensaio 3	12 de Agosto das 9:16h às 14:30h	- Altura da camada de clínquer de 0,4m - Depressão no cabeçote de -4mmCA
Ensaio 4	12 de Agosto das 15:00h às 23:20h	- Altura da camada de clínquer de 0,4m - Depressão no cabeçote de -4mmCA - Permutadores em manual
Ensaio 5	13 de Agosto das 00:00h até às 9:25h	- Depressão no cabeçote de -4mmCA - Permutadores em automático
Ensaio 6	13 de Agosto das 9:30h até às 16:00h	- Altura da camada de clínquer de 0,4m - Depressão no cabeçote de -6mmCA
Ensaio 7	13 de Agosto das 16:05h até 14 de Agosto às 9:30h (retirando o intervalo de 2:45h em que forno teve parado)	- Altura da camada de clínquer de 0,6m - Depressão no cabeçote de -6mmCA - Delta H entre a velocidade da 1ªgrelha e a 2ªgrelha de 0%

5. Resultados e Discussão

Neste capítulo são apresentados os resultados obtidos na realização de ambas as partes experimentais, bem como a sua respetiva discussão.

5.1 Balanço Energético

De seguida apresentam-se os resultados do balanço energético realizado ao arrefecedor 8 da linha 5.

Na tabela seguinte pode-se ver os resultados obtidos para os caudais de ar, tendo em conta as equações do tubo de *pitot* para calcular a velocidade e posteriormente o caudal.

Tabela 5.1 Dados dos caudais de ar do arrefecedor

Ar de Secagem	Temperatura	°C	470
	Velocidade	m/s	4,4
	Caudal	Nm³/h	2 413
Ar em Excesso	Temperatura	°C	250
	Caudal	Nm³/h	92 595
Ar dos Ventiladores	Temperatura	°C	20
	Caudal	Nm³/h	146 396
Ar de Despoeiramento	Temperatura	°C	31,7
	Velocidade	m/s	11,13
	Caudal	Nm³/h	3 025
Ar Ambiente	Temperatura	°C	20

O ar secundário é calculado segundo a equação 4, e toma o valor de

$$Ar\ Secundário = 146\ 396 + 3\ 025 - 92\ 595 - 1\ 407 = 55\ 418 \frac{Nm^3}{h}$$

Para a pesagem de clínquer obteve-se 3 balanços parciais e a partir daí calculou-se a quantidade de clínquer:

Tabela 5.2 Quantidade de clínquer durante o balanço

Balanço Parcial	kg	Somatório (kg)
13:00h às 17:00h	201 060	637 800
17:00h às 21:00h	220 860	
21:00h às 01:00h	215 880	

A temperatura de saída do clínquer foi calculada a partir de dois métodos, como acima descritos. Durante o ensaio retiram-se 7 temperaturas de saída do clínquer: 138°C, 44°C, 66°C, 82°C, 112°C, 96°C e 103°C.

Tabela 5.3 Dados da entrada e saída de clínquer

Entrada de Clínquer	Temperatura	°C	1 400
	Caudal	kg/h	53 150
	Calor específico (c_p)	kJ/kg K	1,10
Saída de Clínquer	Temperatura	°C	92
	Caudal	kg/h	53 150
	Calor específico (c_p)	kJ/kg K	0,78

A chama dentro do forno atinge temperaturas que chegam aos 1450°C para tal considerou-se que a temperatura de entrada de clínquer no arrefecedor é de 1400°C.

A área do arrefecedor é de 138m², assim é possível retirar o valor da radiação e convecção, pelas equações descritas acima.

Tabela 5.4 Energia de Radiação e Convecção

	kJ/h m ²	kJ/kg clínquer
Radiação	234,43	0,61
Convecção	165,42	0,43
Total		1,04

Pela equação 1 converteu-se os caudais para o calor fornecido, na tabela a seguinte apresentam-se esses valores. É necessário recorrer a tabelas para retirar o calor específico médio dos gases e o calor específico médio da entrada e saída de clínquer do arrefecedor, ver anexo V.

Tabela 5.5 Balanço Energético

	Balanço Energético				
	kJ/kg clínquer	kcal/kg clínquer	% Energia	Somatório	Desvio
	Entradas				0,08
Ar dos Ventiladores	0	0	0,00	362,75	
Ar de despoeiramento	0,87	0,20	0,06		
Clínquer	1518,00	362,55	99,94		
	Saídas				
Ar em Excesso	524,26	125,21	34,52	362,67	
Ar de Secagem	15,68	3,74	1,03		
Ar Secundário	921,40	220,06	60,68		
Clínquer	56,16	13,41	3,70		
Radiação e Convecção	1,04	0,25	0,07		

Posto isto é possível calcular o rendimento,

$$\eta = \frac{220,06 + 3,74}{362,55 + 0 + 0,2} \times 100\% \approx 62\%$$

Existem valores teóricos que ajudam a perceber se os valores obtidos para o cálculo da eficiência se encontram dentro da gama exigida. Pela tabela seguinte pode observar-se os valores obtidos durante o balanço energético realizado e os valores teóricos [25, 42, 45].

Tabela 5.6 Valores do balanço e valores teóricos

	Valores do Balanço Energético	Valores teóricos
Eficiência (%)	62	60-70
Quantidade de ar dos ventiladores (Nm³/kg clínquer)	2,97	2,5-3,0
Quantidade de ar em excesso (Nm³/kg clínquer)	1,74	1,47
Quantidade de ar secundário (Nm³/kg clínquer)	1,04	>0,9
Quantidade de ar para secagem (Nm³/kg clínquer)	0,03	0,31
Temperatura de Ar Secundário (°C)	650	>800
Temperatura de Ar em Excesso (°C)	250	240
Altura da camada de Clínquer (m)	0,45	0,5-0,7

Como é possível observar, existem vários valores que se encontram acima ou abaixo dos valores teóricos mencionados, isto poderá dever-se a variados fatores que prejudicam o bom funcionamento do arrefecedor. Sabendo que o que se pretende é melhorar a eficiência, ou seja, melhorar a quantidade de ar secundário de modo a que seja o suficiente para se garantir uma boa combustão no forno, é importante garantir que a quantidade de ar secundário e a sua temperatura sejam suficientes para tal acontecer.

Analisando o ar secundário, verifica-se que a temperatura está abaixo do valor teórico, este decréscimo na temperatura poderá advir de vários parâmetros, uma troca de calor menos eficiente entre o clínquer e o ar de arrefecimento, a altura da camada, a velocidade das grelhas e a depressão no cabeçote.

De modo a entender a oscilação natural do processo de funcionamento do arrefecedor de clínquer, analisou-se o histórico 1 onde foi colocado apenas o controlo da altura da camada de clínquer no arrefecedor em modo manual através da fixação da velocidade da 1ª grelha em 11 rpm. Esta análise permite ver qual a amplitude de variação natural da recuperação de energia por parte do ar secundário, devendo a amplitude encontrada superior a um funcionamento com controlo automático da altura da camada de clínquer. Permite ainda verificar que apesar de um doseamento constante de farinha ao forno, o mesmo descarrega para o arrefecedor uma quantidade de clínquer oscilante provocando uma variação da altura da camada de clínquer mesmo com velocidade de transporte fixa.

Quando comparamos a altura da camada de clínquer com a temperatura do ar secundário é possível verificar que existe oscilações com enorme amplitude. Quando a altura da camada de clínquer aumenta a temperatura de ar secundário sobe, isto ocorre porque como o ar de

entrada dos ventiladores percorre maior altura de clínquer irá aquecer mais, tornando a temperatura do ar secundário mais elevada.

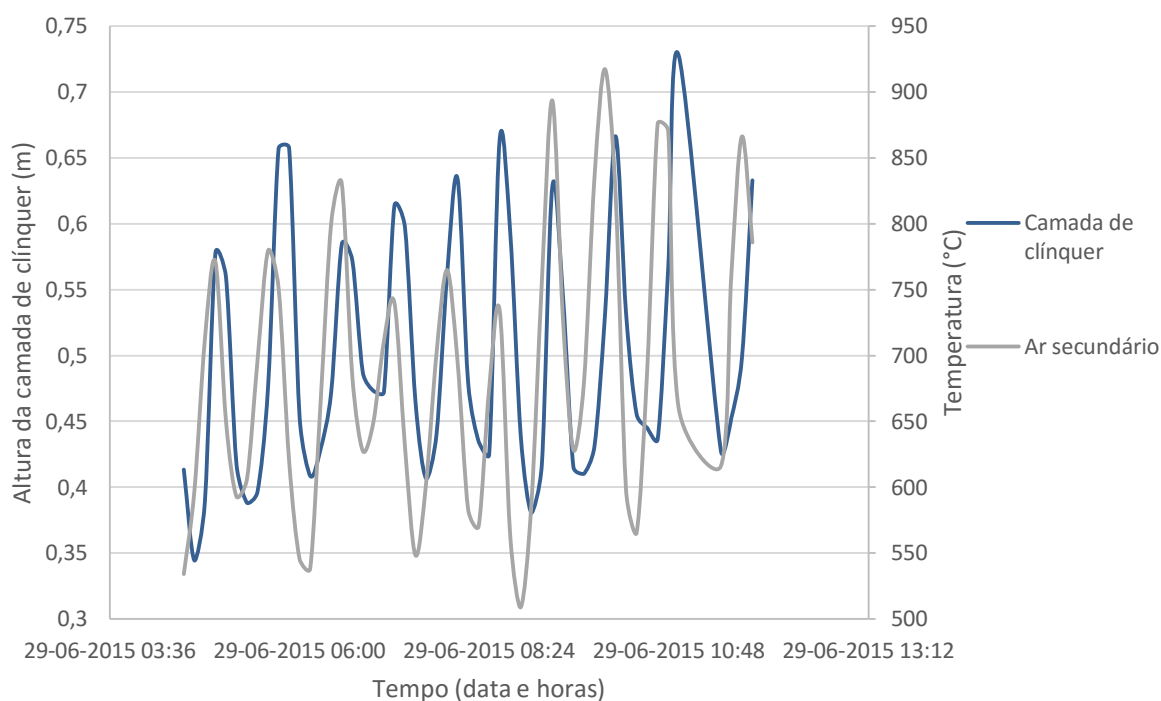


Figura 5.1 Altura da camada de clínquer e temperatura do ar secundário em função do tempo

Mas por outro lado, quando comparando a altura da camada de clínquer com a quantidade de ar secundário, o mesmo já não se verifica. Quando se aumenta a altura da camada de clínquer, há um decréscimo na quantidade, porque como o ar de entrada percorreu mais clínquer, a recuperação em termos de massa de ar secundário será menor.

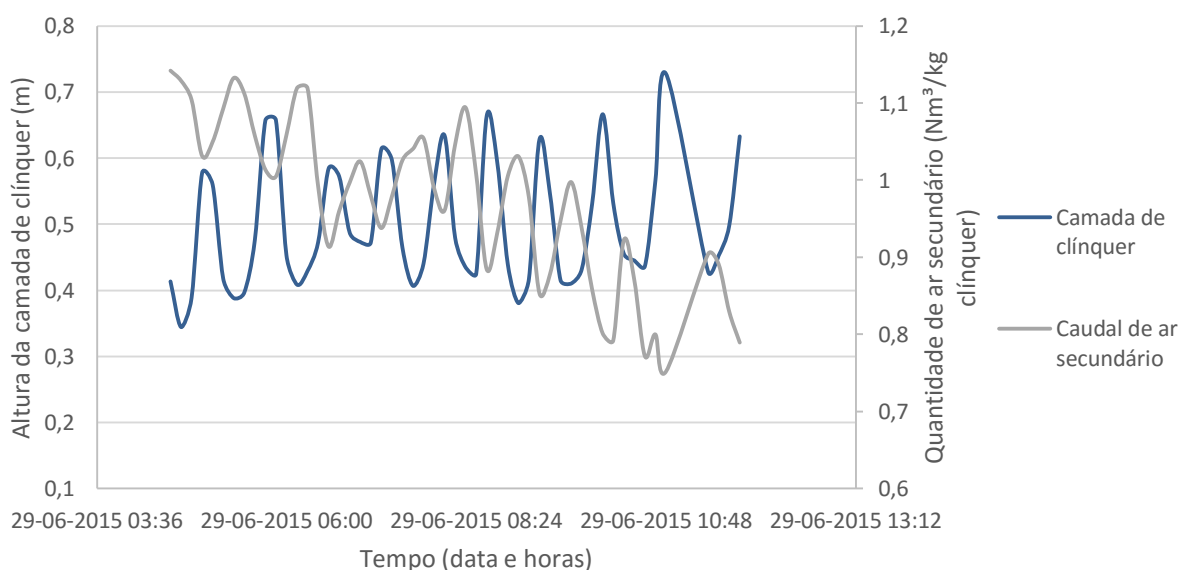


Figura 5.2 Altura da camada de clínquer e a quantidade de ar secundário em função do tempo

Se a temperatura de ar secundário aumenta com o aumento da altura e a quantidade de ar secundário diminui, então o calor também irá sofrer oscilações assim como a eficiência de recuperação de ar secundário. Se a altura da camada de clínquer diminui a energia de ar secundário aumenta.

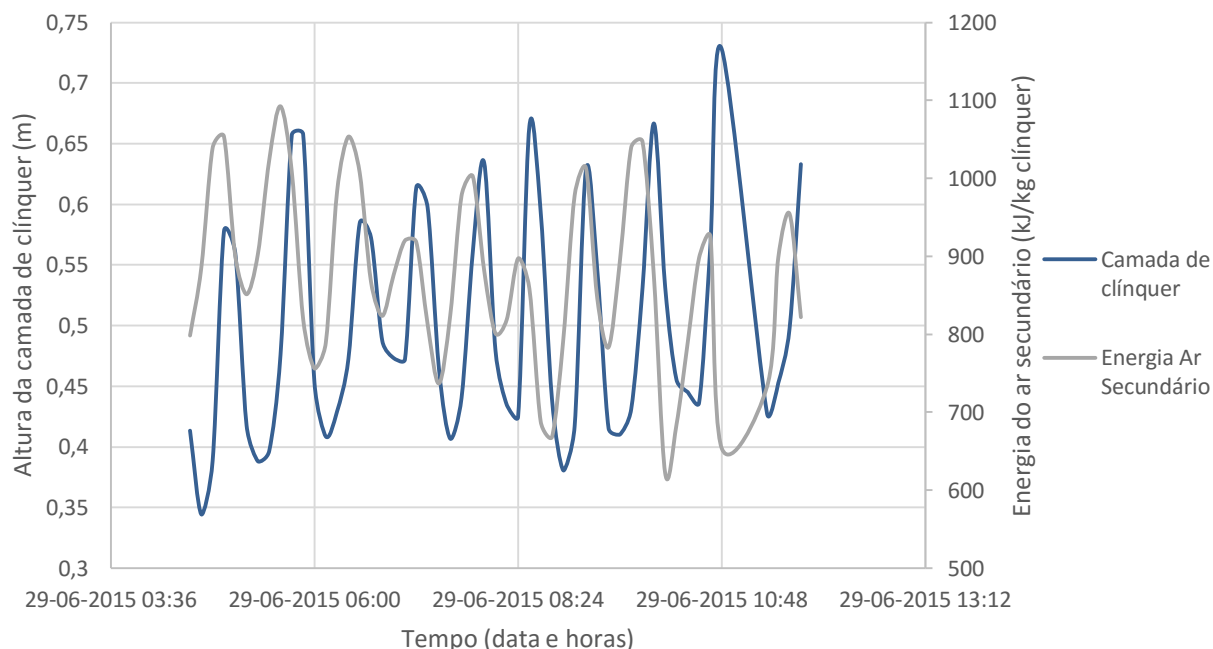


Figura 5.3 Altura da camada de clínquer e a energia de ar secundário em função do tempo

O mesmo irá acontecer à eficiência, sempre que a altura da camada de clínquer aumentar, a eficiência aumenta. Pois a eficiência depende da energia do ar secundário, ou seja, do ar recuperado para o forno para ser possível ocorrer a combustão.

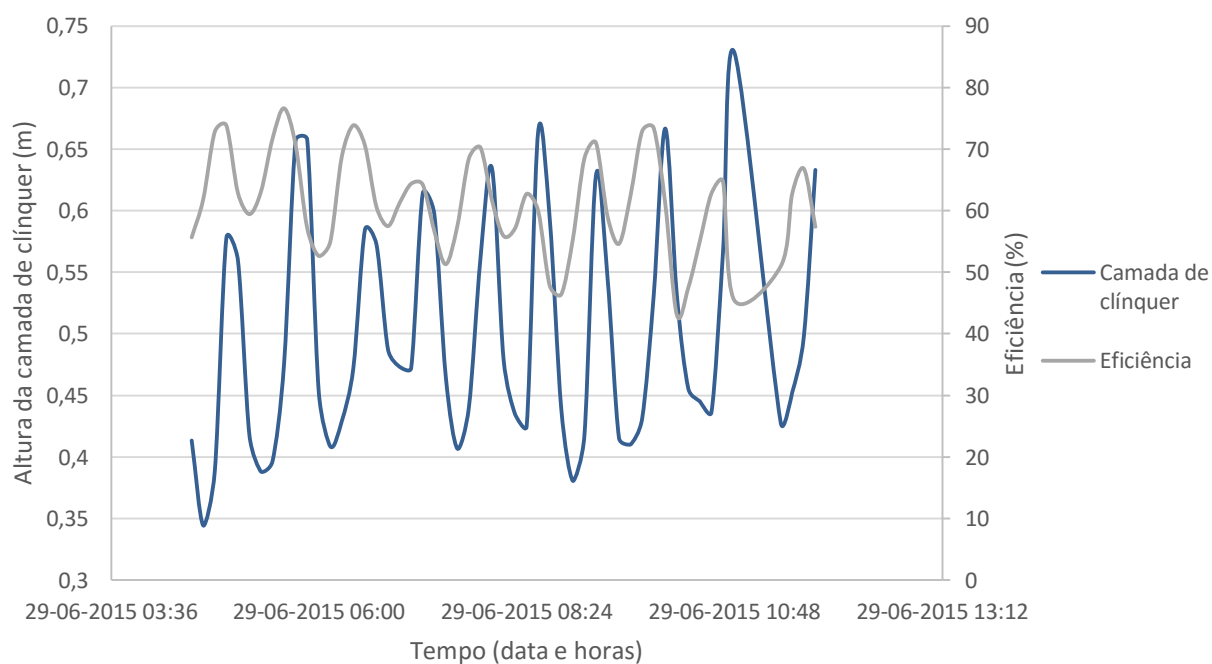


Figura 5.4 Altura da camada de clínquer e a eficiência em função do tempo

5.2 Ensaio

Tendo em conta que se efectuaram 7 ensaios e de modo a apresentar os resultados de uma maneira legível, agrupou-se os ensaios pelas variáveis controladas, assim é mais fácil comparar e discutir os valores.

Na tabela seguinte apresenta-se as diferenças entre os dois arrefecedores, tendo em conta diferentes débitos de farinha ao forno.

Comparando os dois históricos e visto serem de arrefecedores diferentes, é possível observar que o arrefecedor 7 tendo em conta os vários débitos de farinha utiliza menos energia elétrica, verifica-se também que com o aumento do débito da farinha há uma diminuição do consumo específico de energia elétrica, pois como há mais quantidade de clínquer há menor quantidade de ar em excesso.

Relacionando a recuperação de ar secundário, o arrefecedor 7 recupera maior quantidades de ar secundário do que o arrefecedor 8, o que posteriormente levará a uma melhor eficiência, o que também se verifica e também é possível verificar pelo desvio padrão que no arrefecedor 7 é menos acentuado do que no arrefecedor 8.

Tabela 5.7 Histórico 4 – Arrefecedor 8

	80ton/h		85ton/h		90ton/h	
	Set-Point	Valor Real	Set-Point	Valor Real	Set-Point	Valor Real
Produção (ton farinha/h)	80	80,4	85	85,3	90	90,4
Pressão no cabeçote (mmCA)	-4	-3,9	-4	-3,9	-5	-4,6
Altura da camada de clínquer (m)	0,49	0,44	0,45	0,45	0,47	0,47
Ventiladores (m³/s)	37,38	37,32	40,54	40,55	40,86	40,77
V1 (m³/s)	4,06	4,06	4,20	4,20	4,20	4,20
V2 (m³/s)	7,26	7,26	7,50	7,49	7,50	7,49
V3 (m³/s)	8,06	8,00	8,21	8,20	9,00	8,93
V4 (m³/s)	8,50	8,49	10,21	10,21	10,08	10,08
V5 (m³/s)	9,50	9,51	10,42	10,44	10,08	10,07
	Média	Desvio Padrão	Média	Desvio Padrão	Média	Desvio Padrão
Eficiência (%)	44,6	8,3	50,3	10,7	54,6	10,4
Volume de Ar Secundário (Nm³/kg clínq)	0,784	0,094	0,732	0,081	0,854	0,099
Temperatura Ar Secundário (°C)	652,5	122,9	781,3	171,8	728,8	156,4
Calor ar secundário (kJ/kg clínquer)	667,68	120,84	751,61	156,63	812,80	152,15
Temperatura Saída de Clínquer (°C)	107,6	22,6	109,2	27,9	124,4	34,1
Volume de entrada de Ar (Nm³/kg clínq)	2,594	0,040	2,657	0,111	2,523	0,041
Volume de Ar Excesso (Nm³/kg clínq)	1,810	0,094	1,924	0,144	1,668	0,090
Temperatura Ar Excesso (°C)	322,4	46,7	276,5	61,1	278,2	63,9
Consumo Específico de Energia Elétrica do arrefecedor (kW/ton clínq)	-----		-----		-----	

Tabela 5.8 Histórico 5 – Arrefecedor 7

	80ton/h		85ton/h		90ton/h	
	Set-Point	Valor Real	Set-Point	Valor Real	Set-Point	Valor Real
Produção (ton farinha/h)	80,0	80,5	85,0	85,0	90,0	90,0
Pressão no cabeçote (mmCA)	-5,0	-4,7	-4,0	-3,7	-4,0	-3,6
Altura da camada de clínquer (m)	0,48	0,48	0,45	0,44	0,42	0,43
Ventiladores (m³/s)	37,15	36,73	39,79	39,14	39,15	37,94
V1 (m³/s)	4,20	4,12	4,00	4,00	4,00	4,00
V2 (m³/s)	7,24	7,24	7,00	7,00	7,15	7,15
V3 (m³/s)	7,84	7,48	7,80	7,18	7,00	5,83
V4 (m³/s)	8,07	8,08	10,74	10,73	10,00	9,99
V5 (m³/s)	9,80	9,82	10,25	10,23	11,00	10,98
	Média	Desvio Padrão	Média	Desvio Padrão	Média	Desvio Padrão
Eficiência (%)	61,0	6,2	61,0	8,4	59,1	8,4
Volume de Ar Secundário (Nm³/kg clínq)	0,809	0,101	0,974	0,191	0,810	0,123
Temperatura Ar Secundário (°C)	802,5	141,7	723,0	131,4	831,4	150,1
Calor ar secundário (kJ/kg clínquer)	907,06	90,30	907,06	122,32	877,34	122,15
Temperatura Saída de Clínquer (°C)	91,1	15,4	104,7	23,7	128,1	34,8
Volume de entrada de Ar (Nm³/kg clínq)	2,551	0,037	2,575	0,067	2,357	0,049
Volume de Ar Excesso (Nm³/kg clínq)	1,741	0,111	1,600	0,189	1,547	0,140
Temperatura Ar Excesso (°C)	239,6	35,4	254,1	52,5	266,7	48,9
Consumo Específico de Energia Elétrica do arrefecedor (kW/ton clínq)	-----		-----		-----	

Na tabela 5.9, segue-se a comparação entre dois históricos. O histórico 4 representa o funcionamento do arrefecedor 8, quando o débito da farinha ao forno é de 90 ton/h, enquanto o histórico 2 representa uma situação em que os ventiladores V1, V2 e V3 têm velocidades constantes, neste caso significa que estão a trabalhar ao máximo de rotações por minuto possível. Estes ventiladores são os que contribuem para a criação de ar secundário.

Assim, se há maior quantidade de ar a entrar para dentro do forno, haveria de haver mais ar secundário, o que pela tabela se comprova, mas no entanto há menos recuperação de calor, isto porque como há muito ar em excesso, este irá arrefecer o ar secundário, acabando o ar em excesso sair mais quente e consequentemente diminuir a eficiência.

Tabela 5.9 Histórico 4: 90 ton/h e Histórico 2 – Arrefecedor 8

	Histórico 4		Histórico 2	
	90ton/h		Velocidade constante V1, V2 e V3	
	Set-Point	Valor Real	Set-Point	Valor Real
Produção (ton farinha/h)	90	90,4	92	91,9
Pressão no cabeçote (mmCA)	-5	-4,6	-4	-4,2
Altura da camada de clínquer (m)	0,47	0,47	0,47	0,45
Ventiladores (m³/s)	40,86	40,77	43,98	43,60
V1 (m³/s)	4,20	4,20	4,40	4,47
V2 (m³/s)	7,50	7,49	9,00	8,53
V3 (m³/s)	9,00	8,93	8,00	7,99
V4 (m³/s)	10,08	10,08	11,06	11,07
V5 (m³/s)	10,08	10,07	11,52	11,53
	Média	Desvio Padrão	Média	Desvio Padrão
Eficiência (%)	54,6	10,4	51,9	7,3
Volume de Ar Secundário (Nm³/kg clínq)	0,854	0,099	1,030	0,092
Temperatura Ar Secundário (°C)	728,8	156,4	558,5	58,3
Calor ar secundário (kJ/kg clínquer)	812,80	152,15	753,36	103,84
Temperatura Saída de Clínquer (°C)	124,4	34,1	122,3	22,4
Volume de entrada de Ar (Nm³/kg clínq)	2,523	0,041	2,654	0,118
Volume de Ar Excesso (Nm³/kg clínq)	1,668	0,090	1,625	0,137
Temperatura Ar Excesso (°C)	278,2	63,9	298,3	40,215
Consumo Específico de Energia Elétrica do arrefecedor (kW/ton clínq)	-----		-----	

Quando comparamos o histórico 4 com o histórico 1, podemos observar que existem algumas diferenças. Aquela que mais diferença tem é a eficiência, no histórico 1 tem maior valor, pois há a recuperação de maiores quantidades de ar secundário, mesmo a temperatura dando mais baixa.

O desvio padrão no histórico 1 é mais baixo quer na eficiência e na quantidade de ar secundário e na temperatura de ar secundário, o que indica que com o histórico 1, o arrefecedor 8 tem menores oscilações.

Como a temperatura do ar secundário é mais baixo, a temperatura de saída do clínquer é mais alta.

Tabela 5.10 Histórico 4: 90 ton/h e Histórico 1 – Arrefecedor 8

	Histórico 4		Histórico 1	
	90ton/h		Grelha Manual (sem controle da altura da camada)	
	Set-Point	Valor Real	Set-Point	Valor Real
Produção (ton farinha/h)	90	90,4	92,0	91,4
Pressão no cabeçote (mmCA)	-5	-4,6	-5,0	-4,8
Altura da camada de clínquer (m)	0,47	0,47	0,49	0,5
Ventiladores (m³/s)	40,86	40,77	40,20	40,23
V1 (m³/s)	4,20	4,20	4,20	4,20
V2 (m³/s)	7,50	7,49	7,00	6,99
V3 (m³/s)	9,00	8,93	8,00	8,00
V4 (m³/s)	10,08	10,08	10,00	10,02
V5 (m³/s)	10,08	10,07	11,00	11,02
	Média	Desvio Padrão	Média	Desvio Padrão
Eficiência (%)	54,6	10,4	61,3	8,1
Volume de Ar Secundário (Nm³/kg clínq)	0,854	0,099	0,970	0,103
Temperatura Ar Secundário (°C)	728,8	156,4	688,9	104,6
Calor ar secundário (kJ/kg clínquer)	812,8	152,15	876,96	114,11
Temperatura Saída de Clínquer (°C)	124,4	34,1	121,9	40,1
Volume de entrada de Ar (Nm³/kg clínq)	2,523	0,041	2,460	0,051
Volume de Ar Excesso (Nm³/kg clínq)	1,668	0,090	1,488	0,090
Temperatura Ar Excesso (°C)	278,2	63,9	249,2	50,1
Consumo Específico de Energia Elétrica do arrefecedor (kW/ton clínq)	-----		-----	

Após comparar os históricos entre si, apresentam-se agora os ensaios realizados e as devidas discussões.

Na tabela seguinte apresentam-se 3 colunas, uma com o histórico do arrefecedor 7 quando nenhuma variável é modificada, o ensaio 1 em que se alterou a altura da camada de clínquer para um valor abaixo do histórico e o ensaio 6 onde a altura da camada de clínquer está acima do histórico.

O ensaio 1 apresenta melhor eficiência quando comparado ao ensaio 6, havendo maior recuperação de calor de ar secundário. O desvio padrão também é menor, logo haverá menos oscilações quando controlamos a altura da camada para um valor acima do histórico.

Tabela 5.11 Comparação entre o Histórico 5, Ensaio 1 e Ensaio 6 – Arrefecedor 7

	Histórico 5		Ensaio 1		Ensaio 6	
	Pressão -4mmCA e camada 0,45m		Pressão -6mmCA e camada 0,6m		Pressão -6mmCA e camada 0,4m	
	Set-Point	Valor Real	Set-Point	Valor Real	Set-Point	Valor Real
Produção (ton farinha/h)	85,0	85,0	85,0	85,0	85,0	85,0
Pressão no cabeçote (mmCA)	-4,0	-3,7	-6	-5,6	-6	-5,6
Altura da camada de clínquer (m)	0,45	0,44	0,60	0,55	0,40	0,41
Ventiladores (m³/s)	39,79	39,14	38,40	38,09	38,20	38,23
V1 (m³/s)	4,00	4,00	4,20	4,02	4,00	4,00
V2 (m³/s)	7,00	7,00	7,20	7,20	7,20	7,20
V3 (m³/s)	7,80	7,18	8,00	7,89	8,00	7,99
V4 (m³/s)	10,74	10,73	9,00	8,99	9,00	9,01
V5 (m³/s)	10,25	10,23	10,00	9,99	10,00	10,02
	Média	Desvio Padrão	Média	Desvio Padrão	Média	Desvio Padrão
Eficiência (%)	61,0	8,4	59,6	5,4	59,0	9,1
Volume de Ar Secundário (Nm³/kg clínq)	0,974	0,191	0,738	0,093	0,833	0,103
Temperatura Ar Secundário (°C)	723,0	131,4	914,4	116,0	804,2	141,6
Calor ar secundário (kJ/kg clínquer)	907,06	122,32	886,13	78,69	877,00	132,63
Temperatura Saída de Clínquer (°C)	104,7	23,7	97,9	16,6	132,3	30,1
Volume de entrada de Ar (Nm³/kg clínq)	2,575	0,067	2,506	0,023	2,514	0,016
Volume de Ar Excesso (Nm³/kg clínq)	1,600	0,189	1,768	0,089	1,682	0,097
Temperatura Ar Excesso (°C)	254,1	52,5	242,3	30,3	243,5	51,5
Consumo Específico de Energia Elétrica do arrefecedor (kW/ton clínq)	-----		-----		-----	

A tabela seguinte demonstra as diferenças entre o ensaio 2 e 3, em que se manteve a depressão no cabeçote a -4mmCA e fez-se variar a altura da camada de clínquer.

O calor recuperado como ar secundário é mais elevado na situação em que a altura da camada é menor, no ensaio 3, havendo também maior recuperação de caudal de ar secundário e consequentemente maior eficiência, mas em contrapartida a amplitude é maior, o que leva a maiores oscilações no sistema.

Tabela 5.12 Comparação entre o Histórico 5, Ensaio 2 e Ensaio 3 – Arrefecedor 7

	Histórico 5		Ensaio 2		Ensaio 3	
	Pressão -4mmCA e camada 0,45m		Pressão -4mmCA e camada 0,6m		Pressão -4mmCA e camada 0,4m	
	Set-Point	Valor Real	Set-Point	Valor Real	Set-Point	Valor Real
Produção (ton farinha/h)	85,0	85,0	85,0	85,0	85,0	85,0
Pressão no cabeçote (mmCA)	-4,0	-3,7	-4	-3,6	-4	-3,6
Altura da camada de clínquer (m)	0,45	0,44	0,60	0,55	0,40	0,39
Ventiladores (m³/s)	39,79	39,14	38,40	38,07	38,38	38,36
V1 (m³/s)	4,00	4,00	4,20	4,05	4,20	4,18
V2 (m³/s)	7,00	7,00	7,20	7,20	7,20	7,20
V3 (m³/s)	7,80	7,18	8,00	7,82	8,00	7,98
V4 (m³/s)	10,74	10,73	9,00	9,00	8,99	9,01
V5 (m³/s)	10,25	10,23	10,00	10,00	9,99	9,99
	Média	Desvio Padrão	Média	Desvio Padrão	Média	Desvio Padrão
Eficiência (%)	61,0	8,4	55,7	7,6	59,2	10,3
Volume de Ar Secundário (Nm³/kg clínq)	0,974	0,191	0,799	0,121	0,850	0,113
Temperatura Ar Secundário (°C)	723,0	131,4	796,2	130,5	792,9	155,7
Calor ar secundário (kJ/kg clínquer)	907,06	122,32	829,75	110,24	880,38	149,85
Temperatura Saída de Clínquer (°C)	104,7	23,7	121,5	30,6	140,5	50,2
Volume de entrada de Ar (Nm³/kg clínq)	2,575	0,067	2,503	0,026	2,523	0,026
Volume de Ar Excesso (Nm³/kg clínq)	1,600	0,189	1,704	0,116	1,673	0,101
Temperatura Ar Excesso (°C)	254,1	52,5	265,7	40,7	241,1	53,1
Consumo Específico de Energia Elétrica do arrefecedor (kW/ton clínq)	-----		-----		-----	

Após se analisar os ensaios quando a depressão do cabeçote é constante, agora nas tabelas seguintes apresentam-se os resultados quando a altura da camada de clínquer constante e se faz variar a depressão no cabeçote.

Na tabela 5.13 apresentam-se os ensaios 3 e 6, onde se manteve a altura da camada de clínquer a 0,4m e alterou-se a depressão no cabeçote.

No ensaio 6, o desvio padrão do ar secundário, quer temperatura, calor e quantidade são menores que no ensaio 3, mesmo sendo a eficiência mais baixa, no ensaio 6 as oscilações são menores.

Em termos de consumo específico de energia elétrica, o ensaio consome menos energia elétrica para as mesmas toneladas de farinha, o que torna o ensaio mais rentável para a empresa.

Tabela 5.13 Comparação entre o Histórico 5, Ensaio 3 e Ensaio 6 – Arrefecedor 7

	Histórico 5		Ensaio 3		Ensaio 6	
	Pressão -4mmCA e camada 0,45m		Pressão -4mmCA e camada 0,4m		Pressão -6mmCA e camada 0,4m	
	Set-Point	Valor Real	Set-Point	Valor Real	Set-Point	Valor Real
Produção (ton farinha/h)	85,0	85,0	85,0	85,0	85,0	85,0
Pressão no cabeçote (mmCA)	-4,0	-3,7	-4	-3,6	-6	-5,6
Altura da camada de clínquer (m)	0,45	0,44	0,40	0,39	0,40	0,41
Ventiladores (m³/s)	39,79	39,14	38,38	38,36	38,20	38,23
V1 (m³/s)	4,00	4,00	4,20	4,18	4,00	4,00
V2 (m³/s)	7,00	7,00	7,20	7,20	7,20	7,20
V3 (m³/s)	7,80	7,18	8,00	7,98	8,00	7,99
V4 (m³/s)	10,74	10,73	8,99	9,01	9,00	9,01
V5 (m³/s)	10,25	10,23	9,99	9,99	10,00	10,02
	Média	Desvio Padrão	Média	Desvio Padrão	Média	Desvio Padrão
Eficiência (%)	61,0	8,4	59,2	10,3	59,0	9,1
Volume de Ar Secundário (Nm³/kg clínq)	0,974	0,191	0,850	0,113	0,833	0,103
Temperatura Ar Secundário (°C)	723,0	131,4	792,9	155,7	804,2	141,6
Calor ar secundário (kJ/kg clínquer)	907,06	122,32	880,38	149,85	877,00	132,63
Temperatura Saída de Clínquer (°C)	104,7	23,7	140,5	50,2	132,3	30,1
Volume de entrada de Ar (Nm³/kg clínq)	2,575	0,067	2,523	0,026	2,514	0,016
Volume de Ar Excesso (Nm³/kg clínq)	1,600	0,189	1,673	0,101	1,682	0,097
Temperatura Ar Excesso (°C)	254,1	52,5	241,1	53,1	243,5	51,5
Consumo Específico de Energia Elétrica do arrefecedor (kW/ton clínq)	-----		-----		-----	

Na tabela seguinte apresentam-se os resultados quando a altura da camada de clínquer é constante de 0,6m e a depressão no cabeçote é variável.

Comparando o ensaio 2 e o ensaio 5, em que a diferentes é que os permutadores funcionaram em automático. Vemos que o ensaio 5 é mais rentável que o ensaio 2, pois consome menos energia elétrica. Mas em termos de eficiência o ensaio 5 apresenta maior desvio padrão e consequentemente maiores oscilações no sistema arrefecedor.

O ensaio 1 apresenta melhores resultados quando comparado ao ensaio 2, o desvio padrão é menor, o que vai levar a uma melhor estabilidade do sistema. A temperatura do ar secundário é bastante alta, o que irá favorecer a eficiência do sistema, a temperatura de saída do clínquer encontra-se abaixo dos 100°C, o que é muito bom e a temperatura de ar excesso também é menor, o que indica que houve uma boa troca térmica entre o ar de entrada e o clínquer.

Tabela 5.14 Comparação entre o Histórico 5, Ensaio 2, Ensaio 1 e Ensaio 5 – Arrefecedor 7

	Histórico 5		Ensaio 2		Ensaio 1		Ensaio 5	
	Pressão -4mmCA e camada 0,45m		Pressão -4mmCA e camada 0,6m		Pressão -6mmCA e camada 0,6m		Pressão -4mmCA e camada 0,6m	
							Permutadores em automático	
	Set-Point	Valor Real	Set-Point	Valor Real	Set-Point	Valor Real	Set-Point	Valor Real
Produção (ton farinha/h)	85,0	85,0	85,0	85,0	85,0	85,0	85,0	84,9
Pressão no cabeçote (mmCA)	-4,0	-3,7	-4	-3,6	-6	-5,6	-4	-3,6
Altura da camada de clínquer (m)	0,45	0,44	0,60	0,55	0,60	0,55	0,60	0,51
Ventiladores (m³/s)	39,79	39,14	38,40	38,07	38,40	38,09	38,21	38,12
V1 (m³/s)	4,00	4,00	4,20	4,05	4,20	4,02	4,01	3,99
V2 (m³/s)	7,00	7,00	7,20	7,20	7,20	7,20	7,20	7,20
V3 (m³/s)	7,80	7,18	8,00	7,82	8,00	7,89	8,00	7,90
V4 (m³/s)	10,74	10,73	9,00	9,00	9,00	8,99	9,00	9,01
V5 (m³/s)	10,25	10,23	10,00	10,00	10,00	9,99	10,00	10,02
	Média	Desvio Padrão	Média	Desvio Padrão	Média	Desvio Padrão	Média	Desvio Padrão
Eficiência (%)	61,0	8,4	55,7	7,6	59,6	5,4	58,3	10,7
Volume de Ar Secundário (Nm³/kg clínq)	0,974	0,191	0,799	0,121	0,738	0,093	0,860	0,119
Temperatura Ar Secundário (°C)	723,0	131,4	796,2	130,5	914,4	116,0	767,9	134,2
Calor ar secundário (kJ/kg clínquer)	907,06	122,32	829,75	110,24	886,13	78,69	867,94	151,72
Temperatura Saída de Clínquer (°C)	104,7	23,7	121,5	30,6	97,9	16,6	124,8	36,3
Volume de entrada de Ar (Nm³/kg clínq)	2,575	0,067	2,503	0,026	2,506	0,023	2,511	0,030
Volume de Ar Excesso (Nm³/kg clínq)	1,600	0,189	1,704	0,116	1,768	0,089	1,651	0,115
Temperatura Ar Excesso (°C)	254,1	52,5	265,7	40,7	242,3	30,3	253,2	63,1
Consumo Específico de Energia Elétrica do arrefecedor (kW/ton clínq)	-----		-----		-----		-----	

A tabela seguinte encontra-se em mostrar dois ensaios em que se operou com os permutadores em automático e em manual. O ensaio realizado apresenta como principal objetivo perceber se é mais rentável funcionar com um controlo dos permutadores em manual ou em automático.

Pela tabela é possível observar que o arrefecedor ao trabalhar com os permutadores em automático irá consumir menos energia elétrica por tonelada de clínquer do que os permutadores em manual.

Tabela 5.15 Comparação entre o Ensaio 2 e Ensaio 4 – Arrefecedor 7

	Ensaio 2		Ensaio 4	
	Pressão -4mmCA e camada 0,6m		Pressão -4mmCA e camada 0,6m	
	Permutadores em Automático		Permutadores em Manual (1500 RPM)	
	Set-Point	Valor Real	Set-Point	Valor Real
Produção (ton farinha/h)	85,0	85,0	85,0	84,8
Pressão no cabeçote (mmCA)	-4	-3,6	-4	-3,7
Altura da camada de clínquer (m)	0,60	0,55	0,60	0,52
Ventiladores (m³/s)	38,40	38,07	38,40	38,10
V1 (m³/s)	4,20	4,05	4,20	4,08
V2 (m³/s)	7,20	7,20	7,20	7,20
V3 (m³/s)	8,00	7,82	8,00	7,84
V4 (m³/s)	9,00	9,00	9,00	8,90
V5 (m³/s)	10,00	10,00	10,00	9,89
	Média	Desvio Padrão	Média	Desvio Padrão
Eficiência (%)	55,7	7,6	55,6	9,6
Volume de Ar Secundário (Nm³/kg clínq)	0,799	0,121	0,841	0,100
Temperatura Ar Secundário (°C)	796,2	130,5	752,0	139,9
Calor ar secundário (kJ/kg clínquer)	829,75	110,24	828,2	139,31
Temperatura Saída de Clínquer (°C)	121,5	30,6	131,2	43,2
Volume de entrada de Ar (Nm³/kg clínq)	2,503	0,026	2,510	0,047
Volume de Ar Excesso (Nm³/kg clínq)	1,704	0,116	1,669	0,104
Temperatura Ar Excesso (°C)	265,7	40,7	265,7	63,6
Consumo Específico de Energia Elétrica do arrefecedor (kW/ton clínq)	-----		-----	

Por fim, apresenta-se o ensaio é que se mudou a delta G2/G1 das grelhas. Desde que os arrefecedores foram instalados na fábrica da Maceira fixou-se uma percentagem para este delta G2/G1. Então o objetivo é perceber se se ao mudar esse delta G2/G1, iremos ter um ganho em termos de energia elétrica, pois a velocidade entre as grelhas iria ser igual e se a eficiência iria ser melhor.

Pela observação da tabela 5.16 vemos que a eficiência, a quantidade, a temperatura e o calor de ar secundário do ensaio 7 são mais baixos que do ensaio 1. O desvio padrão no ensaio 7 é mais elevado do que no ensaio 1, o que leva a maior instabilidade do arrefecedor.

Tabela 5.16 Comparação entre o Ensaio 1 e Ensaio 7 – Arrefecedor 7

	Ensaio 1		Ensaio 7	
	Pressão -6mmCA e camada 0,6m		Pressão -6mmCA e camada 0,6m	
	%delta G2/G1 = 10%		%delta G2/G1 = 0%	
	Set-Point	Valor Real	Set-Point	Valor Real
Produção (ton farinha/h)	85,0	85,0	85,0	85,0
Pressão no cabeçote (mmCA)	-6	-5,6	-6	-5,6
Altura da camada de clínquer (m)	0,60	0,55	0,60	0,54
Ventiladores (m³/s)	38,40	38,09	37,76	37,64
V1 (m³/s)	4,20	4,02	4,02	4,00
V2 (m³/s)	7,20	7,20	7,13	7,13
V3 (m³/s)	8,00	7,89	8,00	7,90
V4 (m³/s)	9,00	8,99	9,09	9,08
V5 (m³/s)	10,00	9,99	9,52	9,53
	Média	Desvio Padrão	Média	Desvio Padrão
Eficiência (%)	59,6	5,4	54,8	8,6
Volume de Ar Secundário (Nm³/kg clínq)	0,738	0,093	0,703	0,095
Temperatura Ar Secundário (°C)	914,4	116,0	886,5	158,5
Calor ar secundário (kJ/kg clínquer)	886,13	78,69	816,58	125,41
Temperatura Saída de Clínquer (°C)	97,9	16,6	119,5	27,6
Volume de entrada de Ar (Nm³/kg clínq)	2,506	0,023	2,476	0,046
Volume de Ar Excesso (Nm³/kg clínq)	1,768	0,089	1,772	0,094
Temperatura Ar Excesso (°C)	242,3	30,3	262,7	49,8
Consumo Específico de Energia Elétrica do arrefecedor (kW/ton clínq)	-----		-----	

Composição do clínquer no dia dos históricos e ensaios

Na tabela seguinte podemos observar os valores de C₃S, C₂S, C₃A, C₄AF, cal livre e os fatores LSF e FL.

A quantidade de C₃S no clínquer deve ser de 50-70% [46], tal como presente na tabela. Para o C₂S este deve ter uma percentagem de 15-25%, verificando-se que no histórico 3, no histórico 4 para 80 ton/h e no ensaio 1 esse valor se encontra abaixo, em contra partida apresentam maiores quantidades de C₃S.

Para o C₃A este deve apresentar-se em quantidades entre 0-17% [46], estando todos os históricos e ensaios dentro dos parâmetros. O C₄AF deve encontrar-se entre 5-15% [46] e pela tabela todos os valores se encontram dentro do intervalo teórico.

A cal livre deve encontrar-se em menores quantidades possíveis, pois baixa a resistência mecânica dos cimentos, sendo o intervalo de 0,5-1,5% [46], pela tabela vemos que o histórico 2, o histórico 4 para 80 ton/h, 85 ton/h e 90ton/h e o ensaio 1 encontram-se acima desse valor.

Quanto maior o fator LSF maior é a facilidade de moer o clínquer, originando clínquer com maiores teores de C_3S e consequentemente com maior resistência mecânica a idade jovens. É importante que o fator LSF esteja entre os 92-100% [6, 12], pela tabela seguinte verifica-se que tal acontece.

Para a fase líquida (FL) é prescindível que esta esteja entre os 23-28% [6,12] e pela tabela é possível confirmar que todos os valores se encontram dentro do intervalo teórico.

Tabela 5.17 Composição do clínquer

		C_3S	C_2S	C_3A	C_4AF	Cal livre	LSF	FL
Histórico 1		-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----
Histórico 2		-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----
Histórico 3		-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----
Histórico 4	80ton/h	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----
	85ton/h	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----
	90ton/h	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----
Histórico 5	80ton/h	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----
	85ton/h	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----
	90ton/h	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----
Ensaio 1		-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----
Ensaio 2		-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----
Ensaio 3		-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----
Ensaio 4		-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----
Ensaio 5		-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----
Ensaio 6		-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----
Ensaio 7		-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----

6. Conclusões e Propostas Futuras

Ao realizar o balanço energético para o arrefecedor 8 é possível concluir que quanto maior a taxa de recuperação de calor pelo ar secundário e pelo ar para a moagem de carvão, face ao calor que entra para dentro do arrefecedor, melhor a eficiência.

O balanço energético realizado ao arrefecedor permite observar a oscilação cíclica e as amplitudes do processo e verificar que o equipamento encontra-se a trabalhar dentro dos parâmetros típicos da literatura, tendo-se verificado a utilização de fator específico de ar de arrefecimento perto do máximo da literatura o que provoca um valor ligeiramente alto de ar de excesso e uma temperatura de ar secundário inferior ao previsto.

Tendo em conta o histórico 4 e o balanço energético realizado, percebemos que quanto maior a toneladas introduzidas no forno, maior será a eficiência de recuperação de energia mas em contra partida maior será a amplitude de oscilação do arrefecedor.

Em relação aos históricos analisados e aos ensaios realizados é possível observar várias eficiências de recuperação de calor inferiores ao mínimo do intervalo teórico para a eficiência de recuperação de calor (60-70%). Para além do facto dos dois arrefecedores se encontrarem no momento dos ensaios a necessitarem de manutenção mecânica e civil (substituição de placas, substituição de martelos do britador, reparação da grelha de descarga e reposição do estado de condição do “altar” do arrefecedor), verificou-se que a gestão da produção ainda não alterou o total de ar de arrefecimento, continuando a trabalhar numa situação de excesso de ar de arrefecimento para garantir a menor temperatura de saída do clínquer. Atualmente, com a medição contínua de temperatura de saída do clínquer, a gestão da produção deverá ajustar os objetivos para o ar de arrefecimento total por forma a maximizar a eficiência de recuperação de calor e minimizar o consumo de energia elétrica.

Da comparação do ensaio 3 e o ensaio 6, onde a variável que se alterou foi a depressão no cabeçote, é possível verificar que a alteração desta variável numa situação de igual quantidade de ar de arrefecimento vai implicar uma alteração da quantidade de ar secundário recuperado. Uma alteração na quantidade total de ar de arrefecimento deveria sempre implicar um ajuste no objetivo na depressão do cabeçote por forma a manter constante a quantidade de ar secundário, pois a quantidade de ar secundário recuperado depende do controlo de ar de arrefecimento total (objetivos de caudal dos cinco ventiladores) e do objetivo de depressão no cabeçote (controlado para velocidade do ventilador de tiragem do arrefecedor). Verificou-se o referido pela literatura que para a mesma quantidade de ar de arrefecimento, um menor valor de depressão no cabeçote implica um maior caudal de ar secundário.

O ensaio 1 com os objetivos de altura da camada de clínquer de 0,6m e depressão no cabeçote de -6mmCA é o que apresenta melhor e mais regular eficiência de recuperação de calor, tendo a gestão do processo alterado os seus objetivos para estes valores, estando atualmente com um sistema mais estável e com diminuição das paragens do sistema provocadas por uma recuperação excessiva de calor obtida através do ar secundário.

A gestão do processo, tendo agora possibilidade de acompanhar a evolução da temperatura de saída do clínquer, deverá realizar mais testes por forma a afinar os controladores (em termos de tempo resposta e grau de atuação), determinar quais os melhores objetivos para as várias condições de operação do forno e definir objetivos específicos por quilograma de clínquer para uniformizar o funcionamento do sistema.

6.1 Propostas futuras

De modo a continuar o trabalho iniciado nesta tese serão apresentados alguns estudos ou propostas de equipamentos que poderão ser uma mais valia para a qualidade do clínquer produzido.

- Estudo do arrefecedor 8 da linha 5

Para um melhor entendimento do arrefecedor da linha 5 propõe fazer um estudo que devido a vários fatores não foi possível realizar. Testar as mesmas variáveis que foram estudadas no arrefecedor 7, como a altura de camada de clínquer, a depressão no cabeçote do forno, o funcionamento do permutador, a velocidade das grelhas e a relação entre as velocidades das duas grelhas. Obter a eficiência de cada ensaio e a partir daí tirar conclusões sobre quais os valores objetivos a utilizar visando a melhoria de funcionamento do equipamento.

- Verificação das alterações realizadas ao altar do arrefecedor 8

Durante o estágio foi possível acompanhar uma manutenção ao arrefecedor 8. Esta manutenção consistiu na alteração da configuração do “altar” do arrefecedor 8 com vista a ter uma melhor distribuição da altura e granulometria do clínquer ao longo da largura do arrefecedor. Como a linha 5 ainda continua parada, não foi possível testar se a alteração realizada ao arrefecedor irá trazer benefícios na eficiência deste.

A imagem seguinte apresenta o “altar”, nome dado ao sítio onde cai o clínquer quando sai do forno, onde pode observar-se que o refratário de encontra inclinado de modo a que quando o clínquer cai do forno, este seja direcionado à grelha móvel de uma forma uniforme.



Figura 6.1 "Altar" antes da manutenção

Com a manutenção realizada, o objetivo consistiu em melhorar o altar, definindo inclinações específicas, de modo a melhorar a caída do clínquer. Como é possível observar pela seguinte figura:



Figura 6.2 "Altar" depois da manutenção

No anexo VI é possível encontrar a mesma figura, mas com os valores das alterações feitas.

- Estudo do controlo da 2ªgrelha por controlo da pressão do ventilador 4

Tendo em conta o controlo que se faz para a 1ªgrelha, o objetivo é utilizar o mesmo raciocínio e aplicar na 2ªgrelha. Em vez de a 2ªgrelha ser controlada pela velocidade a que vai a 1ªgrelha, ser controlada pela pressão na câmara do ventilador 4 e perceber se este controlo irá trazer benefícios na estabilidade do arrefecedor.

- Estudo da composição do clínquer e granulometria versus eficiência do arrefecedor

Este estudo consiste em realizar uma análise pormenorizada sobre a composição do clínquer, quando se controla um novo parâmetro. O clínquer é composto maioritariamente por C_3S , C_2S , C_3A e C_4AF e é importante que estes compostos estejam em quantidades suficientes para garantir um clínquer de boa qualidade.

Ao longo desta tese a variação da composição do clínquer não foi tida em conta, não tendo sido analisada, quando se fazia variar as várias variáveis possíveis no arrefecedor. O objetivo é verificar se com os mesmos objetivos de controlo do arrefecedor e com variação do LSF ou da quantidade e qualidade da fase líquida ocorre uma variação da eficiência de recuperação de calor do arrefecedor já que a variação destes fatores químicos implica uma alteração física do clínquer produzido (distribuição granulométrica do clínquer), daí ser tão importante fazer este tipo de estudo.

Um estudo para a granulometria do clínquer produzido é bastante importante pois este fator poderá influenciar a recuperação de ar secundário. Através da figura seguinte é possível observar que quando a granulometria do clínquer é baixa, o ar passa com maior dificuldade entre as partículas e o clínquer sai mais frio, pois consegue arrefecer a partícula na sua totalidade. O mesmo não acontece quando as partículas são grossas, pois o ar passa mais facilmente pelas partículas, devido ao espaço sem nada é maior, mas em contra partida a partícula no seu interior fica quente, saindo mais quente.

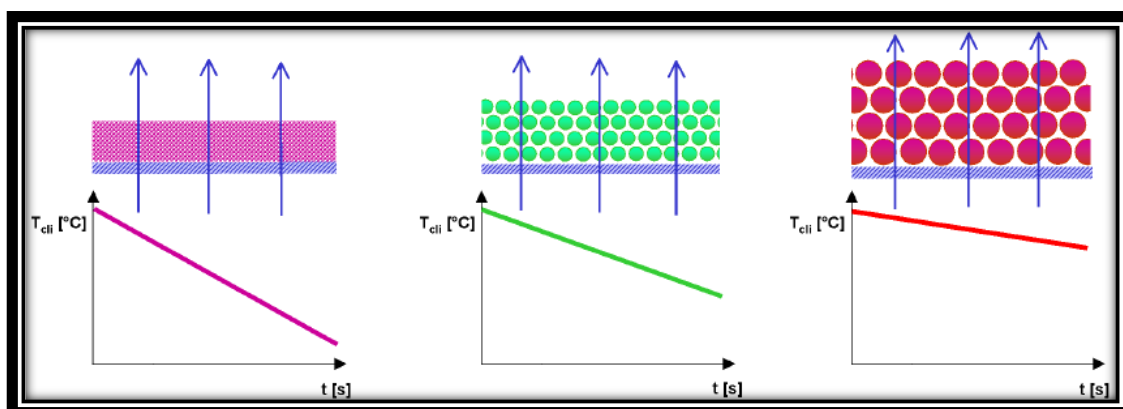


Figura 6.3 Temperatura de saída do clínquer em função do tempo tendo em conta a granulometria do clínquer na grelha [47]

- Estudo sobre a velocidade do forno (taxa de enchimento do forno) e qualidade da fase líquida

Este estudo vai ao encontro do estudo anteriormente mencionado, saber a composição dos elementos que constituem o clínquer poderá ajudar a entender se a velocidade do forno é a correta assim como o débito da farinha.

O forno rotativo é um reator químico onde se processam várias reações químicas, acima descritas, essas reações levam à composição do clínquer. A fase líquida ocorre exclusivamente dentro do forno e permite a formação dos compostos maioritários do clínquer a partir de 1280°C, a quantidade de fase líquida é de cerca de 23-27% do cru.

Assim os objetivos deste estudo é analisar a quantidade de fase líquida tendo em conta a sua viscosidade, ou seja, se as partículas são mais viscosas é sinal que há maior quantidade de fase líquida e consequentemente maior aderência às paredes do forno, logo com o movimento de rotação do forno, o clínquer irá subir e ao cair no arrefecedor será em bolas maiores. E estudar a velocidade de rotação do forno, se a velocidade for elevada poderá arrastar por mais tempo o clínquer e consequentemente formar bolas maiores de clínquer. A ilustração seguinte ajuda a perceber o efeito que a velocidade tem sobre a dimensão do clínquer que vai para o arrefecedor e a sua contribuição.

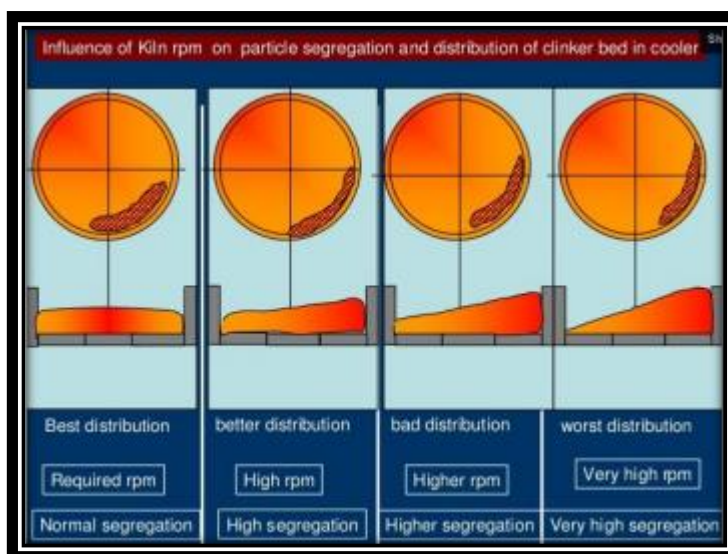


Figura 6.4 Influência da velocidade do forno para a segregação e distribuição do clínquer no arrefecedor [48]

- Estudo da configuração da grelha à saída do arrefecedor

Atualmente a distância que existe entre as barras de seleção do material que vai ao britador é de 30 mm sendo o consumo elétrico do britador de cerca de 5kW/h sendo a potência instalada de 30kW, o que sugere que a quantidade de material que chega ao britador é muito baixa.

O objetivo do estudo é analisar a quantidade de clínquer existente entre os 25 e 30 mm e determinar se a quantidade presente justifica uma diminuição da distância entre as barras para 25 mm, ou seja, o britador iria britar maior quantidade de clínquer o que pode ter um impacto positivo no consumo específico de energia elétrica do cimento.

- Estudo da altura da camada de clínquer no arrefecedor, medida por equipamento de transmissão de nível [49]

Este estudo teria como objetivo medir a altura da camada de clínquer usando um aparelho, em vez de recorrer à pressão da 1ª câmara, sendo atualmente o método usado pela fábrica. O facto de se recorrer a este tipo de medição faz com que a resposta seja lenta e assim ocorra maiores oscilações no arrefecedor, pois só quando o operador começa a perceber que existe oscilações é que irá atuar.

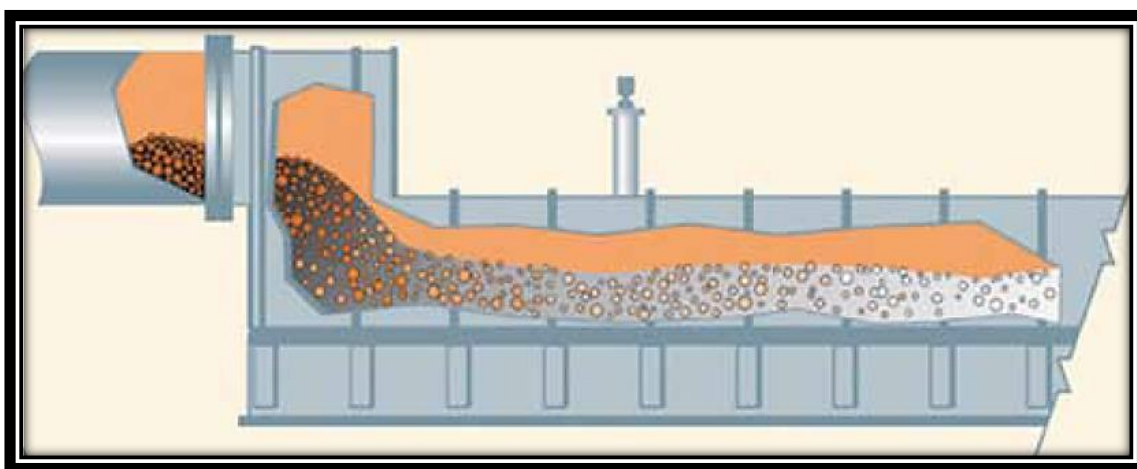


Figura 6.5 Localização do equipamento de transmissão de nível no arrefecedor

Este tipo de aparelho irá permitir que seja possível medir a altura da camada de clínquer no arrefecedor em tempo real e atuar na velocidade das grelhas sempre que ocorra uma oscilação, de modo que a camada de clínquer fique sempre constante, tornando o tempo de resposta ao problema mais rápida. O aparelho é instalado no topo do arrefecedor, mais ou menos a meio deste, como é possível observar pela figura 6.5.

O *design* desta peça assegura que o produto não irá sofrer sobreaquecimento, a parede superior da caixa de nível do transmissor é concebida por um sistema de ar de refrigeração automática (utilizando ar comprimido) para proteger o transmissor das elevadas temperaturas. Caso este o sistema acima falhe, o transmissor de nível é protegido por uma porta automática entre o aparelho e o arrefecedor que fecha quando as temperaturas são muito elevadas, estando sempre o aparelho protegido contra as elevadas temperaturas.

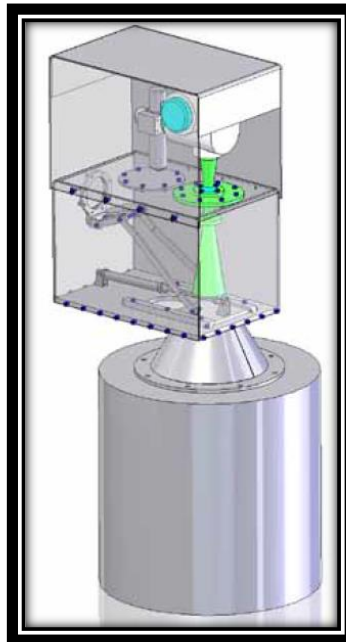


Figura 6.6 Design do equipamento de transmissão de nível

O aparelho poderá trazer variadas vantagens, tais como, manter o nível da camada de clínquer estável e assim ser possível recuperar elevadas taxas de calor, o que consequentemente levará a uma diminuição do consumo de combustíveis. A operação da regulação da camada não irá depender do operador, tornando-se o tempo de resposta mais curto. Como a temperatura do forno estará estável, irá aumentar o tempo de vida útil do forno, tal como o refratário. E por fim irá impedir que por vezes o clínquer saia com temperaturas mais elevadas devido ao não controlo da altura da camada de clínquer.

7. Bibliografia

- [1] Empresa Secil [Online]. Disponível: http://www.secil.pt/default.asp?pag=historico_cimento. [Acedido Março 2015].
- [2] Cement [Online]. Disponível: <http://minerals.usgs.gov/minerals/pubs/commodity/cement/mcs-2014-cemen.pdf> [Acedido Junho 2015].
- [3] Edifícios e Energia [Online]. Disponível: <http://edificioseenergia.pt/pt/noticia/a-industria-cimenteira-e-profundamente-verde13405>. [Acedido Junho 2015].
- [4] Empresa Secil [Online]. Disponível: <http://www.secil.pt/default.asp?pag=historico>. [Acedido Março 2015]
- [5] FLSmidth Institute, "Operation and Optimization of Kiln Systems: The Kiln Process and Basic Principles of Operation", pp. 7, August 2006.
- [6] Manual de Formação da Qualidade I. Elaborado por: FSQP-CHN, 11 de Agosto de 2008.
- [7] G. S. S. Mota, "Processo de Fabrico: Cozedura".
- [8] G.A. R. N. Oliveira, "Critérios de Projeto para Moinhos de Cimento Portland" – Projeto Final de Curso para a Obtenção do Grau de Engenheiro Químico, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Janeiro 2012.
- [9] Norma Portuguesa: NP 4486 [Online]. Disponível: http://apambiente.pt/_zdata/Politicas/Residuos/Planeamento/PERSU_II/Despacho21295_2009_CDR.pdf. [Acedido Julho 2015].
- [10] C. A. L. Bandeira, "Avaliação da Estabilidade Biológica de Combustível Derivado de Resíduo" – Dissertação para obtenção do grau de Mestre em Engenharia Ambiente, IST – Universidade Técnica de Lisboa, Novembro 2010.
- [11] Capítulo 2: Clínquer de Cimento Portland [Online]. Disponível: http://www.tede.udesc.br/tde_busca/arquivo.php?codArquivo=1195. [Acedido Abril 2015].
- [12] Livro: Química do Cimento.
- [13] G. S. S. Mota, "Manual de a Qualidade na Industria Cimenteira".
- [14] Programa de Formação Continuada: Quadros, "Processo I: Cozedura/ Clinquerização", empresa Secil.
- [15] F. L. Smidth & Co A/S, "Mechanical Maintenance of Kiln Systems: Grate Cooler Design".
- [16] Cement Industries [Online]. Disponível: <http://www.inece.org/mmcourse/chapt6.pdf>. [Acedido Abril 2015]

- [17] J. B. Souza e B. Borges, "Aplicação da modelagem MICFD para Avaliação do comportamento e formato da chama de um forno de cimento", Optimus – Soluções em Engenharia de Processos, 2014.
- [18] V. O. Carvalho, R. Silva e G. J. Menon, "Aplicação das técnicas de otimização no co-processamento de resíduos em fornos rotativos de fábricas de cimento", Escola Federal de Engenharia de Itajubá, Instituto de Engenharia Mecânica, 1997.
- [19] L. B. Pereira, "Modelagem e Análise de transferência de calor de um resfriador de clínquer tipo satélite para forno de cimento", Pós-Graduação em Engenharia Mecânica, Universidade Federal de Minas Gerais, Janeiro 2014.
- [20] Norma Portuguesa, NP EN 197-1, pp.10, 2001.
- [21] A. S. Coutinho, "Fabrico e Propriedades do Betão", Volume I, Laboratório Nacional de Engenharia Civil, 1988.
- [22] A. L. de Castro e V. C. Pandolfelli, "Revisão: Conceitos de dispersão e empacotamento de partículas para a produção de concretos especiais aplicados na construção civil" [Online]. Disponível: http://www.scielo.br/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0366-69132009000100003. [Acedido Março 2015].
- [23] B. C. S. Neto, "Proposição de um sistema de gestão na atividade de co-processamento de resíduos industriais em fornos de cimento", Dissertação para obtenção do grau de Mestre em Sistemas de Gestão, Universidade Federal Fluminense.
- [24] ECRA – European Cement Research Academy 2013 [Online]. Disponível: http://www.ecra-online.org/uploads/media/ECRA_Newsletter_2-2013.pdf. [Acedido Março 2015].
- [25] Holderbank, "Cement Seminar: Process Technology – Clinker Coolers" PDF, 2000.
- [26] Coolers on British Kilns [Online]. Disponível: http://www.cementkilns.co.uk/cooler_rotary.html. [Acedido Abril 2015].
- [27] ClinkerCoolers [Online]. Disponível: <https://pt.scribd.com/doc/98748629/Clinker-Cooler#scribd>. [Acedido Março 2015].
- [28] E. Jessen e S. Hundeboel, "Cool It, avoid Snowmen! – Production Engineer APO cement compare and contrast the properties of previous generations of clinker cooler with the new ABC inlet cooler", FLSmidth, Fevereiro 2007.
- [29] FLSmidth, "FLSmidth Cross-Bar™ Cooler" PDF, 2011.
- [30] J. I. Bhatti, F. M. Miller e S. H. Kosmatka, "Innovations in Portland Cement Manufacturing", CD400, Portland Cement Association, Stokir, Illinois, U.S.A., pp. 477-498, 2004.

- [31] Cross-Bar cooler [Online]. Disponível: <http://www.flsmidth.com/en-US/Industries/Cement/Products/Pyroprocessing/FLSmidth+Cross-Bar+Cooler/FLSmidth+Cross-Bar+Cooler>. [Acedido: Agosto 2015].
- [32] A. K. Chatterjee, "Chemistry and engineering of the clinkerization process – Incremental advances and lack of breakthroughs", *Cement and Concrete Research* 41, pp. 624-641, 2011.
- [33] Cemprotec [Online]. Disponível: <http://www.cemprotec.com/cemprotecrdc.html>. [Acedido Abril 2015].
- [34] CTEC – Centro Técnico Corporativo, "Relatório de Ensaio: Balanço Energético Forno 5", Laboratório de Ambiente – Secil, pp. 3, Outubro 2012.
- [35] Apresentação "Máquinas Hidráulicas – Ventiladores", Instituto Superior de Engenharia de Coimbra.
- [36] M. X. S. de Carvalho, "Equipamentos de Fragmentação: Uma Revisão Avaliando Circuitos Alternativos para a Moagem de Finos" – Monografia, Universidade Federal de Minas Gerais, Julho 2012.
- [37] Manual de Formação de Ambiente I, Elaborado por: CTAS-MJB/CTQB-VDT, pp. 61-62 em 18-12-2008.
- [38] Filtro de Mangas [Online]. Disponível: <http://www.imapa.com.br/Pulse%20Jet.html>. [Acedido Agosto 2015].
- [39] L. M. A. Henriques, "Intervenções de Manutenção na Linha de Fabrico de Cimento Branco: Optimização do Britador de Clínquer", Relatório de Estágio para obtenção do Grau de Mestre em Equipamentos e Sistemas Mecânicos, Instituto Politécnico de Coimbra, 2010.
- [40] Manual de Formação de Manutenção I – Secil.
- [41] Hermes Cruz, "Guia Prático – Forno, Arrefecedor Linha 5 e 6 Formação", Secil, 2006.
- [42] GATX-FULLER S.A., "Notices D'Exploitation de l'équipement du refroidisseur – Fuller", Cimpor, Maceira-Liz, 1983.
- [43] Documento da fábrica Maceira-Liz, "PT P0103 – Cozedura, Condução e Controlo", elaborado por: GQAE em 9-6-2009.
- [44] ISSO 6911-1, "Stationary source emissions – Manual and automatic determination of velocity and volume flow rate in ducts", Part 1: Manual reference method, 2013.

[45] P. A. Alsop, H. Chen, A. L. Chin-Fatt, A. J. Jackura, M. I. McCabe e H. H. Tseng, "Cement Plant Operations Handbook: The concise guide to cement manufacture", International Cement Review, 3ª Edição, Novembro 2001.

[46] Cimento: Uma matéria-prima essencial no fabrico de argamassas [Online]. Disponível: <http://www.apfac.pt/congresso2005/comunicacoes/Paper%2037.pdf>. [Acedido Agosto 2015].

[47] Apresentação: Clinker Coolers PDF.

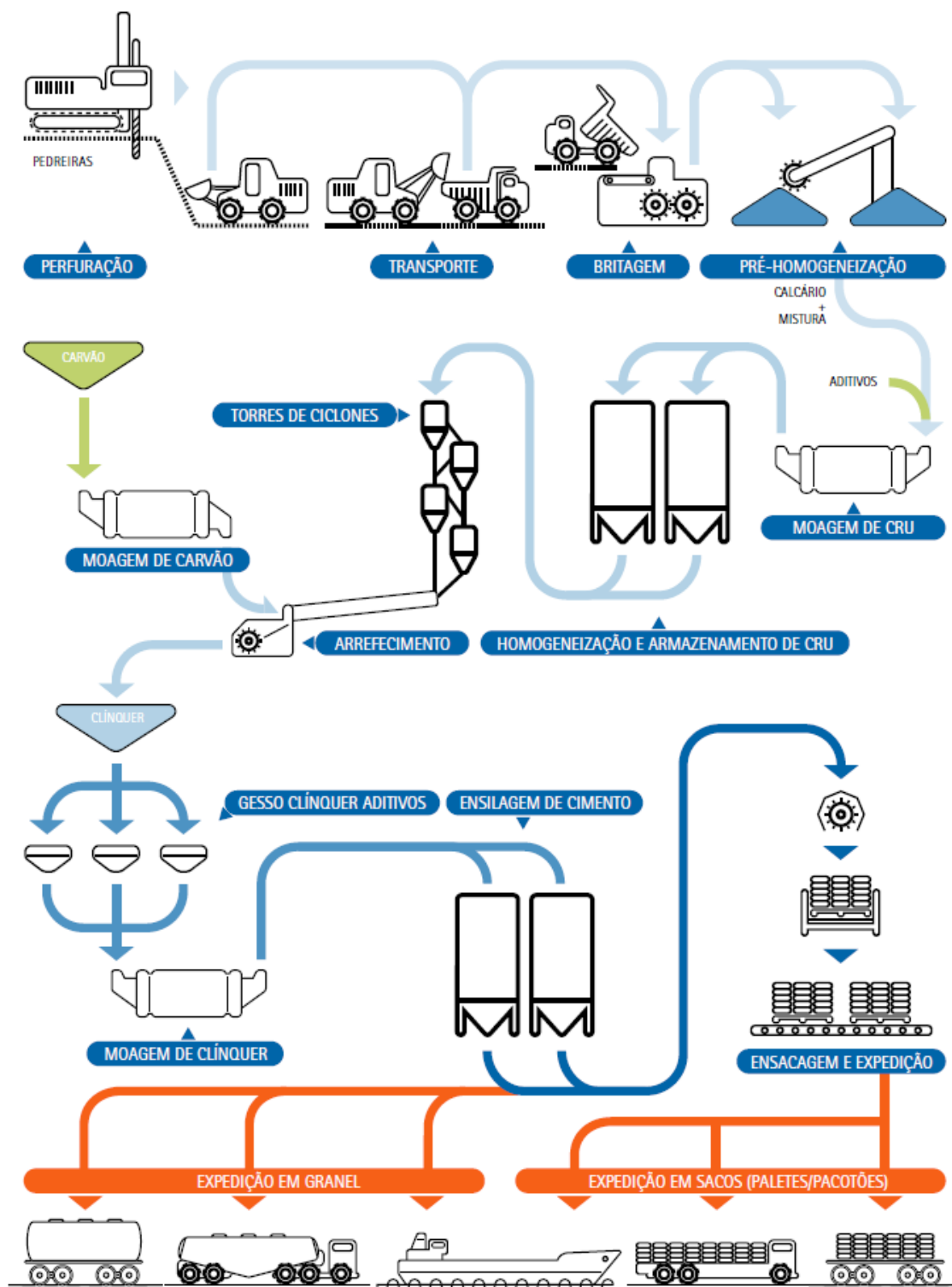
[48] Red river in clinker cooler [Online]. Disponível: <http://www.slideshare.net/pradeepdeepi/red-river-in-clinker-cooler>. [Acedido Agosto 2015].

[49] U. Akay, "The Fons Delta Level Transmitter", Fons Technology International, International Cement Review, Março 2013.

8. Anexos

Anexo I – Diagrama do processo fabril de cimento cinzento [4]

DIAGRAMA DO FABRICO DE CIMENTO



Módulo Silicioso – Exprime a relação entre os silicatos de cálcio e a fase líquida.

$$MS = \frac{SiO_2}{Al_2O_3 + Fe_2O_3} = 1,9 \text{ a } 3,2$$

Um valor alto de MS implica uma cozedura mais difícil e maior consumo de combustível, tende a provocar instabilidade volúmica e cal livre elevada. Aumenta as dificuldades de incrustações e portanto há maiores perdas por radiação na envolvente do forno. Aumenta também a deterioração do refratário do forno. O cimento adquire uma presa lenta e um endurecimento mais lento, o que não é favorável.

Módulo Silicioso Ácido – Indica as condições ótimas para manter um bom nível de crosta na zona de cozedura.

$$MSA = \frac{SiO_2}{Al_2O_3} = 2,5 \text{ a } 3,5$$

Módulo Aluminoso ou Curso Fundente – Controla a viscosidade da fase líquida e a cinética de formação do C₃A.

$$MA = \frac{Al_2O_3}{Fe_2O_3} = 1,5 \text{ a } 2,5$$

O valor de MA determina o papel de fundente no cru, ou seja:

- Quando MA < 1,23 a alumina age como fundente
- Quando MA > 1,23 o ferro age como fundente

Um valor alto de MA abrange uma cozedura mais difícil e consequentemente um elevado consumo de combustível, aumento da quantidade de C₃A, C₃S e C₂S e redução de C₄AF e da fase líquida. Há uma tendência para produzir cimento de prensa rápida e de alta resistência inicial e existe um aumento da viscosidade da fase líquida.

Um MA alto juntamente com um MS baixo dá origem a uma presa rápida, sendo necessário a adição de maiores quantidades de gesso para regulação da prensa.

Fator de Saturação em Cal - Parâmetro que indica a relação percentual entre a quantidade de cal presente na farinha e a quantidade máxima teoricamente possível de se combinar com os restantes elementos da mesma.

Para MA > 0,64

$$FSC = \frac{100CaO}{2,8SiO_2 + 1,65Al_2O_3 + 0,35Fe_2O_3} = 92 \text{ a } 100 \text{ (no clínquer)}$$

Para MA < 0,64

$$FSC = \frac{100CaO}{2,8SiO_2 + 1,1Al_2O_3 + 0,7Fe_2O_3} = 92 \text{ a } 100 \text{ (no clínquer)}$$

Tendo em conta que as reações que dão origem às diferentes fases não são completas:

$$FSC = \frac{100CaO}{2,8SiO_2 + 1,18Al_2O_3 + 0,65Fe_2O_3} = 92 \text{ a } 100 \text{ (no clínquer)}$$

Se tivermos em conta a presença de MgO tem-se:

$$FSC = \frac{100(CaO + 0,75MgO)}{2,8SiO_2 + 1,18Al_2O_3 + 0,65Fe_2O_3} = 92 \text{ a } 100 \text{ (no clínquer)}$$

Se houver a presença de SO₃ fica:

$$FSC = \frac{100(CaO - 0,75SO_3)}{2,8SiO_2 + 1,18Al_2O_3 + 0,65Fe_2O_3} = 92 \text{ a } 100 \text{ (no clínquer)}$$

Se o valor de FSC for elevado implica que o cru irá ser difícil de cozer, existe uma tendência para a produção de cimento expansivo, ou seja, contem elevado teor em cal livre, há um aumento da quantidade de C₃S e uma diminuição de C₂S, sendo mais fácil de moer. Existe a produção de cimento com pressa lenta e resistências iniciais elevadas.

Fase líquida na zona de cozedura

Para MA <1,38

$$\%FL(1338^\circ C) = 8,2Al_2O_3 - 5,22Fe_2O_3 + MgO + K_2O + Na_2O + SO_3$$

Para Ma >1,38

$$\%FL(1338^\circ C) = 6,1Fe_2O_3 + MgO + K_2O + SO_3$$

Para MA <0,64

$$\%FL(1450^\circ C) = 3,0Al_2O_3 - 2,25Fe_2O_3 + MgO + K_2O + Na_2O + SO_3$$

A fase líquida é imprescindível para a formação de C₃S, sendo a sua percentagem de 23 a 28%. Quando %FL é inferior a 20, o forno torna-se instável e o clínquer tende a ser pulverulento (pó muito fino e é facilmente levado pelo ar). Há a formação de anéis na zona de transição e aumenta a recirculação de álcalis, o que não desejado. Quando a %FL é superior a 30 há um excesso de fase líquida de baixa viscosidade e alta densidade que ataca severamente o refratário do forno,

Relação Álcalis/Sulfatos

A partir desta relação depende a formação de crosta na zona da torre, assim quando o valor é muito pequeno há a formação de crostas de álcalis, enquanto o valor é elevado há a formação de sulfatos.

$$RAS = \frac{SO_3}{Na_2O + K_2O} = 0,6 \text{ a } 1,4 \text{ (no clínquer)}$$

Módulo de Sulfatos – Exprime a relação entre os sulfatos e os componentes voláteis do cru. Quando a relação está desequilibrada ocorrem problemas de formação de anéis e bloqueio de ciclones.

$$M_{SO_3} = \frac{SO_3}{80 \times \left[\left(\frac{K_2O}{90} + \frac{Na_2O}{62} \right) - \left(\frac{Cl^-}{35,5} \right) \right]} = 0,83 \text{ a } 1,00 \text{ (no clínquer)}$$

Anexo III – Ventiladores da Linha 5 e 6

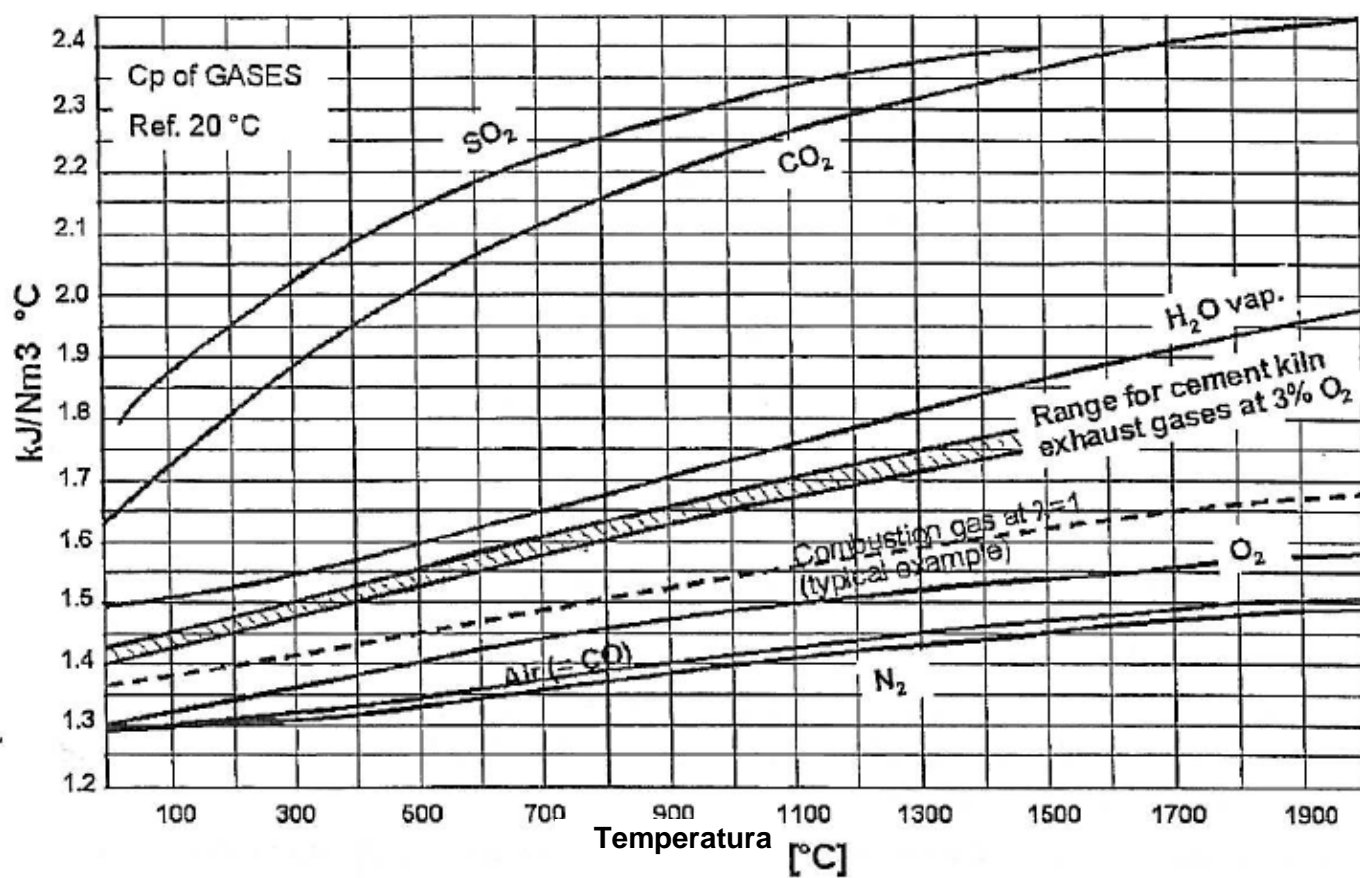
Ventiladores da Linha 5			
Ventilador	Características	Motor	Características
V1 - Solyvent	Ventil RD 15120m ³ /h 48 kW ⊗Polia- 224mm de 6 gornes 6 Correias SPB-4000	M1-EFACEC	Mot AC 3F 380 V 75 kW 1480 rpm ⊗Polia- 236 mm de 6 gornes 6 Correias SPB-4000
V2 - Solyvent	Ventil RD 22600 m ³ /h 48 kW ⊗Polia- 280mm de 4 gornes 4 Correias SPB-3750	M2 - ABB	Mot AC 3F 380 V 75 kW 1484 rpm ⊗Polia- 400 mm de 4 gornes 4 Correias SPB-3750
V3 - Solyvent	Ventil RD 27720 m ³ /h 50 kW ⊗Polia- 300mm de 4 gornes 4 Correias SPB-3750	M3-EFACEC	Mot AC 3F 380 V 75 kW 1480 rpm ⊗Polia- 400 mm de 4 gornes 4 Correias SPB-3750
V4 - Solyvent	Ventil RD 47160 m ³ /h 55 kW ⊗Polia- 236mm de 6 gornes 6 Correias SPB-3750	M4-EFACEC	Mot AC 3F 380 V 75 kW 1480 rpm ⊗Polia- 250 mm de 6 gornes 6 Correias SPB-3750
V5 - Solyvent	Ventil RD 51120 m ³ /h 51 kW ⊗Polia- 500mm de 4 gornes 4 Correias SPA-4000	M5-WEG	Mot AC 3F 380 V 75 kW 1485 rpm ⊗Polia- 500 mm de 4 gornes 4 Correias SPA-4000

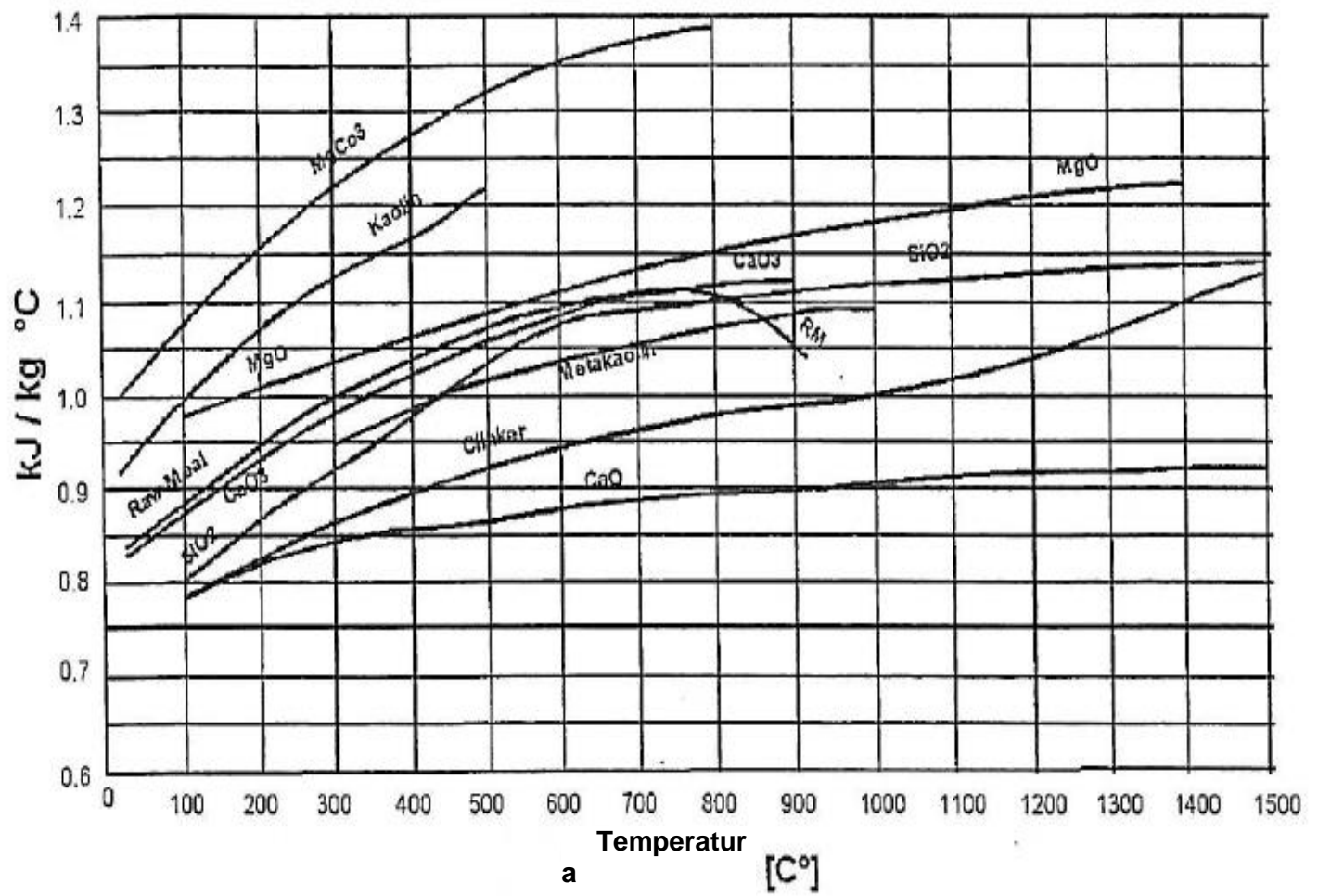
Ventiladores da Linha 6			
Ventilador	Características	Motor	Características
V1 - Solyvent	Ventil RD 15120 m ³ /h 48 kW ⊗ Polia- 224mm de 6 gornes 6 Correias SPB-4000	M1-EFACEC	Mot AC 3F 380 V 75 kW 1480 rpm ⊗ Polia- 236 mm de 6 gornes 6 Correias SPB-4000
V2 - Solyvent	Ventil RD 22600 m ³ /h 48 kW ⊗ Polia- 280mm de 4 gornes 4 Correias SPB-3750	M2 - ABB	Mot AC 3F 380 V 75 kW 1500rpm ⊗ Polia- 400 mm de 4 gornes 4 Correias SPB-3750
V3 - Solyvent	Ventil RD 27720 m ³ /h 50 kW ⊗ Polia- 300mm de 4 gornes 4 Correias SPB-3750	M3-EFACEC	Mot AC 3F 380 V 75 kW 1480 rpm ⊗ Polia- 400 mm de 4 gornes 4 Correias SPB-3750
V4 - Solyvent	Ventil RD 47160 m ³ /h 55 kW ⊗ Polia- 236mm de 6 gornes 6 Correias SPB-3750	M4-EFACEC	Mot AC 3F 380 V 75 kW 1480 rpm ⊗ Polia- 250 mm de 6 gornes 6 Correias SPB-3750
V5 - Solyvent	Ventil RD 51120 m ³ /h 51 kW ⊗ Polia- 500mm de 4 gornes 4 Correias SPA-4000	M5-EFACEC	Mot AC 3F 380 V 75 kW 1480rpm ⊗ Polia- 500 mm de 4 gornes 4 Correias SPA-4000

Anexo IV – Deposição das placas ao longo das grelhas e a composição química de cada placa, referente a ambos os arrefecedores

← Grelha 2										← Material ←										Caída do forno											
Grelha 1																															
	17	16	15	14	13	12	11	10	9	8	7	6	5	4	3	2	1														
	F17	F16	F15	F14	F13	F12	F11																								
D1	B117	B116	B115	B114	B113	B112	B111	B110	B109	B108	B107																				
D2	C117	C116	C115	C114	C113	C112	C111	M20	M19	M18	M17	M16	M15	M14																	
D3	C217	C216	C215	C214	C213	C212	C211	M30	M29	M28	M27	M26	M25	M24	M23	M22	M21														
D4	C317	C316	C315	C314	C313	C312	C311	M40	M39	M38	M37	M36	M35	M34	M33	M32	M31														
D5	C417	C416	C415	C414	C413	C412	C411	M50	M49	M48	M47	M46	M45	M44	M43	M42	M41														
D6	C517	C516	C515	C514	C513	C512	C511	M60	M59	M58	M57	M56	M55	M54																	
D7	A117	A116	A115	A114	A113	A112	A111	A110	A109	A108	A107																				
	E17	E16	E15	E14	E13	E12	E11																								
	17	16	15	14	13	12	11	10	9	8	7	6	5	4	3	2	1														
Grelha 1																															
Caída para o Britador										← Material ←										Grelha 1 →											
Grelha 2																															
32	31	30	29	28	27	26	25	24	23	22	21	20	19	18	17	16	15	14	13	12	11	10	9	8	7	6	5	4	3	2	1
	F216	F215	F214	F213	F212	F211	F210	F209	F208	F207	F206	F205	F204	F203	F202	F201															
	B232	B231	B230	B229	B228	B227	B226	B225	B224	B223	B222	B221	B220	B219	B218	B217	B216	B215	B214	B213	B212	B211	B210	B209	B208	B207	B206	B205	B204	B203	B202
	C632	C631	C630	C629	C628	C627	C626	C625	C624	C623	C622	C621	C620	C619	C618	C617	C616	C615	C614	C613	C612	C611	C610	C609	C608	C607	C606	C605	C604	C603	C602
	C732	C731	C730	C729	C728	C727	C726	C725	C724	C723	C722	C721	C720	C719	C718	C717	C716	C715	C714	C713	C712	C711	C710	C709	C708	C707	C706	C705	C704	C703	C702
	C832	C831	C830	C829	C828	C827	C826	C825	C824	C823	C822	C821	C820	C819	C818	C817	C816	C815	C814	C813	C812	C811	C810	C809	C808	C807	C806	C805	C804	C803	C802
	C932	C931	C930	C929	C928	C927	C926	C925	C924	C923	C922	C921	C920	C919	C918	C917	C916	C915	C914	C913	C912	C911	C910	C909	C908	C907	C906	C905	C904	C903	C902
	C1032	C1031	C1030	C1029	C1028	C1027	C1026	C1025	C1024	C1023	C1022	C1021	C1020	C1019	C1018	C1017	C1016	C1015	C1014	C1013	C1012	C1011	C1010	C1009	C1008	C1007	C1006	C1005	C1004	C1003	C1002
	A232	A231	A230	A229	A228	A227	A226	A225	A224	A223	A222	A221	A220	A219	A218	A217	A216	A215	A214	A213	A212	A211	A210	A209	A208	A207	A206	A205	A204	A203	A202
	E216	E215	E214	E213	E212	E211	E210	E209	E208	E207	E206	E205	E204	E203	E202	E201															
32	31	30	29	28	27	26	25	24	23	22	21	20	19	18	17	16	15	14	13	12	11	10	9	8	7	6	5	4	3	2	1

Placas	Código	Liga	Composição (%peso)
Placa A	28853	GX40 CrNiSi 27-4 DIN	0,3<C<0,5; 1<Si<2,5; Mn≤1,5; P≤0,04; S≤0,03; 25<Cr<28; 3<Ni<6; Mo≤0,5
Placa B	28851	GX40 CrNiSi 27-4 DIN	0,3<C<0,5; 1<Si<2,5; Mn≤1,5; P≤0,04; S≤0,03; 25<Cr<28; 3<Ni<6; Mo≤0,5
Placa C	28847	GX40 CrNiSi 27-4 DIN	0,3<C<0,5; 1<Si<2,5; Mn≤1,5; P≤0,04; S≤0,03; 25<Cr<28; 3<Ni<6; Mo≤0,5
Placa D	28934	GX40 CrNiSi 25- 20 DIN	0,3<C<0,5; 1<Si<2,5; Mn≤2; P≤0,04; S≤0,03; 24<Cr<27; 19<Ni<22; Mo≤0,5
Placa E	28901	GX40 CrNiSi 22- 10 DIN	0,3<C<0,5; 1<Si<2,5; Mn≤2; P≤0,04; S≤0,03; 24<Cr<27; 19<Ni<22; Mo≤0,5
Placa F	28900	GX40 CrNiSi 22- 10 DIN	0,3<C<0,5; 1<Si<2,5; Mn≤2; P≤0,04; S≤0,03; 24<Cr<27; 19<Ni<22; Mo≤0,5
Placa G	28891	GX40 CrNiSi 27-4 DIN	0,3<C<0,5; 1<Si<2,5; Mn≤1,5; P≤0,04; S≤0,03; 25<Cr<28; 3<Ni<6; Mo≤0,5
Placa H	28889	GX40 CrNiSi 25- 12 DIN	0,3<C<0,5; 1<Si<2,5; Mn≤2; P≤0,04; S≤0,03; 24<Cr<27; 11<Ni<14; Mo≤0,5
Placa M	28765	GX40 CrNiSi 27-4 DIN	0,3<C<0,5; 1<Si<2,5; Mn≤1,5; P≤0,04; S≤0,03; 25<Cr<28; 3<Ni<6; Mo≤0,5





Anexo VI – Croqui da manutenção do “altar” do arrefecedor 8

